UNTERSUCHUNGEN ZUR ABBINDEEXPANSION VERSCHIEDENER EINBETTMASSEN UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER ZENTRIFUGALEINBETTUNG

WERNER STECK

1973

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554604_0029

Aus der Prothetischen Abteilung

(Vorstand: Prof.Dr.E.Kraft)

der Klinik für Zahn-,Mund-u.Kieferkrankheiten

(Geschäftsf.Direktor: Prof.Dr.E. Kraft)

der Universität München

Untersuchungen zur Abbindeexpansion verschiedener Einbettmassen unter besonderer Berücksichtigung der Zentrifugaleinbettung.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde in der Zahnheilkunde

verfaßt und einer

Hohen Medizinischen Fakultät

der Ludwig Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

WERNER STECK

aus München

1973

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof.Dr.Dr.Werner Reither

Mitberichterstatter: Prof.Dr.Ewald Kraft

Dekan: Prof.Dr.Wolfgang Spann

Tag der mündlichen Prüfung:

10. Juli 1973

MEINEN ELTERN

IN DANKBARKEIT GEWIDMET

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Einleitung und Problemstellung	1
21	Durchsicht der Literatur im Hinblick auf die durchgeführten experimentellen Untersuchungen	2
211	Form des Prüfkörpers:	2
2111	Isolierung des Stumpfmodelles:	3
212	Gußwachse:	4
2121	Zusammensetzung:	4
2122	Eigenschaften:	4
2123	Verarbeitung der Gußwachse:	8
21231	Verarbeitungstechniken	8
21232	Wachsentspannung:	12
21233	Lagerung:	12
21234	Entfettung der Oberfläche:	13
213	Einbettmassen:	15
2131	Begriff:	15
2132	Einteilung:	16
2133	Zusammensetzung:	16
2134	Chemisch-physikalische Eigenschaften:	18
2135	Abbindevorgang:	19
2136	Beeinflussung der Abbindeexpansion:	25
2137	Werte aus der Literatur	36
2138	Auswirkungen der Abbindeexpansion auf das Wachsmodell:	37
2139	Bisher geübte Meßverfahren zur Bestimmung der Abbindeexpansion:	42
214	Muffelwerkstoff:	46
215	Einbettungsverfahren:	49
216	Wachsaustreibung:	58
217	Das Auflichtmeßverfahren in der zahnärztlichen Literatur:	61

Inhaltsverzeichnis

		Seite
22	Eigene Untersuchungen	65
221	Abbindeexpansion von Einbettmassen	65
2211	Materialien:	65
2212	Methodik:	66
22121	Herstellung der Wachsmodelle:	66
22122	Einbettung der Wachsmodelle:	70
22123	Wachsaustreibung:	76
22124	Herausschneiden der Einbettmassekerne:	76
22125	Meßvorgang:	77
2213	Ergebnisse:	81
2214	Diskussion der Ergebnisse:	90
2215	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Abbindeexpansion	98
222	Untersuchungen zur Zentrifugaleinbettung	99
2221	Verformung der Wachsmodelle durch die Zentrifugalkraft:	99
2222	Fragen der Entmischung:	100
22221	Dichtebestimmung:	100
22222	Diskussion der Ergebnisse:	105
22223	Quant. chemische Analyse des Gipsanteils:	106
22224	Diskussion der Ergebnisse	108
2223	Zusammenfassung der Ergebnisse aus Untersuchungen zur Zentrifugaleinbettung:	108
3	Zusammenfassung der Arbeit:	109
	Literaturverzeichnis	111

1 Einleitung und Problemstellung:

Seit den Veröffentlichungen von PHILBROOK 1897, OLLENDORF 1904 und TAGGART 1907 befindet sich die zahnärztliche Gußtechnik in einem stetigen Wandel, der in der manchmal ungenügenden Paßgenauigkeit unserer Gußobjekte begründet ist.

Obwohl wir heute Einbettungsmassen zur Verfügung haben, die eine ausreichende Gesamtexpansion aufweisen, müssen wir immer wieder feststellen, daß unsere Gußobjekte Verformungen aufweisen. Diese sind vor allem in der Gestalt der Gußobjekte, im Gußwachs und in einer möglichen Verformung der Wachsmodelle durch die abbindende Einbettmasse zu suchen.

Die Verformung von MOD-Wachsmodellen durch die Abbindeexpansion der Einbettmassen wurde von DREYER-JØRGENSEN (13), MUMFORD (68), KRÄUTLE (53) und anderen bereits ausreichend untersucht und bestätigt.

Wir befaßten uns deshalb im Sinne ILGS (46) mit der Frage, inwiefern es bei der indirekten Technik zur Verformung einer Wachsform, die wir auf einem rotationssymmetrischen Kegelstumpf herstellten, kommt. Vor allem sollte wegen der Vielzahl der in der Literatur veröffentlichten, unterschiedlichen Werte das Ausmaß der effektiven Abbindeexpansion mit einem nach ILG (47) für zahnärztliche Zwecke besonders geeignetem Verfahren untersucht werden.

Die unterschiedliche Bewertung der Zentrifugaleinbettungsmethode in der Literatur veranlaßte uns, auch diese Methode auf eine mögliche Verformung der Wachsmodelle, auf die dabei auftretende effektive Expansion, sowie ihre Eignung für das zahnärztliche Gußverfahren zu untersuchen.

21 Durchsicht der Literatur im Hinblick auf die durchgeführten experimentellen Untersuchungen

211 Form des Prüfkörpers:

DREYER-JØRGENSEN (14), fordert auf Grund seiner Überlegungen, die er zur "klinischen Präzision" von Vollgußkronen angestellt hat, einen Konvergenzwinkel des präparierten Kegelstumpfes von 20° bei einem Basisdurchmesser von 5-10 mm und einem angenommenen Gußfehler von 0,4%-0,2%.
ILG (46), (47) verwendete für seine Untersuchungen zur indirekten Technik anfangs einen 3-Stufenzylinder, kam aber wegen auftretender Ausweitungen der gewonnenen Abdrücke davon ab, und verwendete schließlich einen konisch gestalteten Präparationskörper in Gestalt eines Prämolaren- oder Molarenstumpfes.
Aus meßtechnischen Gründen wurde ein Kegelwinkel von 24°, was einer Neigung der Kegelstumpfmantellinie von 12° entspricht, bei einer Höhe von 6 mm und einem Basisdurchmesser von 8 mm, verwendet.
Anfängliche Versuche ILGS mit einem möglichst zahnähnlichen Material, dem Kunstdrechslerknochen, scheiterten an der Wasseraufnahme dieses Werkstoffes; auch Versuche mit Glas als Stumpfmaterial erwiesen sich wegen zu geringer Kantenfestigkeit als nicht zweckmäßig. ILG benutzte schließlich besonders harten Stahl als Stumpfmaterial.
ZÄHRINGER (118), ließ seine Modellstümpfe aus gehärtetem Silberstahl anfertigen. Die Konuswinkel seiner Kegelstümpfe variierten von 0° - 5° bei einer Höhe von 7,3 mm und einem unteren Durchmesser von 8,61-9,82 mm.
ZÄHRINGER machte über die Spaltbildung zwischen Kronenrand und zervikaler Stufe Aussagen zur prozentualen Kontraktion (x) der angefertigten Kronen nach der Formel $x = \frac{100 \cdot tg\alpha \cdot s}{r}$

Er mußte, um die Spaltbreite s, die parallel zur Kegelstumpfachse gemessen wurde, möglichst groß und gut meßbar zu machen, den Kegelwinkel klein wählen.
REITHER (83,84) benutzte einen rotationssymmetrischen Kegelstumpf aus V_2A-Stahl, der ebenfalls aus meßtechnischen Erwägungen einen Kegelwinkel von 24° aufwies und dessen unterer Durchmesser 8 mm bei einer Höhe von 5,9 mm betrug.
Die Maße des ILGschen und REITHERschen Präparationskörper entsprechen demnach etwa den Anforderungen DREYER-JØRGENSENS an einen präparierten Stumpf.

2111 Isolierung des Prüfkörpers bzw. des Stumpfmodelles

Wenn wir ein möglichst exakt passendes Wachsmodell herstellen wollen, müssen wir ein Festkleben des Wachses auf dem Präparationskörper vermeiden. Während bei der direkten Technik das Isolieren der Kavität mit einem Speichelfilm genügt, finden bei der indirekten Technik besondere Trennmittel Verwendung. Paraffinoel und Vaseline scheiden wegen zu großer Schichtdicke, die nach WEIKART (114) nicht mehr als 2µ-5µ betragen soll, aus. Nebenbei hinterlassen sie auf den Wachsmodellen wasserunlösliche Fettreste, die eine gleichmäßige Benetzung durch die Einbettmasse erschweren (DEGUSSA (11)). Isoliermittel die das Gußwachs anlösen, haben sich ebenfalls als ungünstig erwiesen. Wir verwendeten auf Grund der guten praktischen Erfahrungen die SMYD (103) und BONSACK (5) damit gemacht hatten, Kerr Mikrofilm, der sich genügend dünn auf das Präparationsmodell auftragen läßt.

212 Gußwachse:

2121 Zusammensetzung der Gußwachse:

Die in der Zahnheilkunde gebräuchlichen Wachse sind Gemische aus tierischen, pflanzlichen, mineralischen und synthetischen Wachsen. Chemisch sind sie esterartige Verbindungen aus hochmolekularen Fettsäuren und einem einwertigen hochmolekularen Alkohol; zum Teil auch feste höhere Kohlenwasserstoffe und echte Fette (FALK-WEIKART (19), DOLDER (12)).
SOLBRIG (104) weist darauf hin, daß die Zusammensetzung der meisten für die Gußtechnik in den Handel kommenden Wachse Fabrikgeheimnis ist, und gibt als Hauptbestandteile weißes Bienenwachs, Paraffin, Stearin und geringe Zusätze von harzähnlichen Substanzen an.
Nach CRAIG (8) bestehen die handelsüblichen Inlay-Wachse zu etwa 70% aus mineralischen Wachsen, zu 25% aus pflanzlichen und zu 5% aus Bienenwachs.

2122 Eigenschaften der Gußwachse:

Nach ZÄHRINGER (118) ist das Gußwachs eines jener drei Hauptmaterialien, auf denen sich das zahnärztliche Gußverfahren aufbaut. Es läßt sich auf Grund seines thermoplastischen Verhaltens leicht und schnell verarbeiten, ist wirtschaftlich und bei Verwendung am Patienten unschädlich für den menschlichen Organismus.
Wir müssen dafür allerdings einige mehr oder weniger unliebsame Eigenschaften, die in der "Elastizität" und in temperaturabhängigen Volumenveränderungen des Wachses begründet sind, in Kauf nehmen. PRICE (80) und SOLBRIG (104) haben als erste auf die Elastizität des Gußwachses hingewiesen. Nach SOLBRIG ist darunter eine gewisse Federung,

die jedes Wachs unter der Bearbeitungstemperatur aufweist, zu verstehen. Gewalztes Wachs kann bis zu einem gewissen Grad gebogen werden und findet sich wieder ganz oder zum Teil in seine Lage zurück. SOLBRIG hat auch den Begriff "latente Elastizität" geprägt. Das Wachs behält diese bei, wenn es, während es abkühlt, Zug oder Druck ausgesetzt ist. Die latente Elastizität wird erst wieder frei, wenn das Wachs bis zu seiner höchsten Bearbeitungstemperatur erwärmt wird. SOLBRIG hat seine Feststellungen mit einer Reihe von Versuchen, die er an gebogenen Wachsplatten und gedehnten oder gestauchten Wachsstangen durchgeführt hat, belegt.
FALCK-WEIKART (19) faßt den Begriff Elastizität weiter. Er versteht darunter die Fähigkeit des Wachses nach Veränderung seiner Form, die ursprüngliche Gestalt teilweise oder ganz wieder anzunehmen. Zusätzlich zur Elastizität finden wir nach FALCK-WEIKART "innere Spannungen" bei den Gußwachsen. Sie entstehen dadurch, daß Wachs, das in eine Form gegossen wird, schneller erstarrt als es sich vollkommen zusammenziehen kann und werden bei Raumtemperatur nicht frei. Davon unterscheidet man innere Spannungen, die durch Deformationen von Wachsstäbchen in erstarrtem Zustand herrühren. In diesem Fall ist ein Zurückgehen in die ursprüngliche Form wenigstens teilweise der Fall.
Um etwas Klarheit zu schaffen, wollen wir in Zukunft ausschließlich von "inneren Spannungen" sprechen und meinen damit jegliche Art von Spannungen, die das Wachsmodell auf Grund der Verarbeitung des Gußwachses beinhaltet, und die zu Verformungen führen können.
Thermisch bedingte Volumenveränderungen der Gußwachse wurden besonders in der direkten Technik neben der Kontraktion des Gußmaterials für das zu knappe Endmaß der Gußstükke verantwortlich gemacht (SOLBRIG).

Das Ausmaß der Volumenänderung ist abhängig von der verwendeten Wachssorte, von dem beobachteten Temperaturintervall und zu einem geringen Teil von der Meßmethode. Die Untersuchungen von PRICE zit. (104), NELKE (69), DREYER-JØRGENSEN (13), OHASI (73), CRAIG (8) bestätigen dies und erbrachten Werte von 0,017% - 0,16% lin. bei Raumtemperatur und einer Temperaturdifferenz von 1° C.
NELKE konnte außerdem nachweisen, daß die Kontraktions- und Ausdehnungsfähigkeit durch plastisches Verarbeiten, also Kneten des Wachses herabgesetzt werden kann.
VOLLAND und PFAFFENBERGER zit. (4) und CRAIG (8) stellten fest, daß die Expansionsrate (Prozent/1C°) der Gußwachse zum Erstarrungsintervall hin zunimmt. Eine Ausnahme bildet nach CRAIG das Carnaubawachs, ein pflanzlicher Gußwachsbestandteil, das von 20 C° - 52 C° eine lineare Expansion aufweist. Außerdem ist nicht bei allen Wachsen mit einer regelmäßigen Zunahme der Expansionsrate zu rechnen, da die entsprechenden Diagramme teils Kurven bilden, teilweise aber auch linearen Verlauf mit verschiedenen Knickpunkten zeigen.
Bei der Untersuchung natürlich vorkommender in der Zahnheilkunde verwendeter Wachse stellte sich heraus, daß die mineralischen Wachse höhere thermische Expansionskoeffizienten besitzen, als pflanzliche Wachse. So hat Carnauba-Wachs die geringste durchschnittliche thermische Expansionsrate mit 0,015 lin./1C° und Paraffin die höchste mit 0,16% lin./1C° zwischen 20 C° und 52 C° aufzuweisen.
Im Anschluß an die Untersuchungen von PRICE zit. (104) war die thermische Expansionsfähigkeit der Gußwachse allgemein bekannt und man versuchte diese Eigenschaft in verschiedensten Wachsexpansionstechniken zum Ausgleich der Gußkontraktion zu verwerten. Vor allem MAVES (64) und LASATER (60) bewiesen an im Warmwasserbad expandierten Wachsmodellen, daß diese nach Abkühlung auf die Ausgangstemperatur ihre

ursprüngliche Form nicht mehr erreichten. Da sich nach OHASI (73) die thermischen Expansions- und Kontraktionskurven decken, dürften die von MAVES und LASATER beobachteten Formveränderungen auf innere Spannungen zurückzuführen sein, die beim Erwärmen der Wachsmodelle frei werden.
Von den einzelnen Gußwachsen werden im Hinblick auf ihre Verwendung ganz bestimmte Eigenschaften gewünscht.
Inlaywachse die in der direkten Technik verarbeitet werden, müssen bei der Verarbeitungstemperatur eine gewisse Knet- und Formbarkeit aufweisen; die Verarbeitungstemperatur soll außerdem nur wenig oberhalb der Körpertemperatur liegen,um bei vitalen Zähnen keine Schmerzen zu verursachen. Weiterhin soll das Inlaywachs bei der Verarbeitungstemperatur eine nahezu rein plastische Verformung zeigen, während es bei geringer Abkühlung unter die Körpertemperatur fast nur elastisch verformbar sein sollte, um über kleine Unebenheiten der Form hinwegfedern zu können (REHBERG (81)).
Damit die Gußwachse den praktischen Bedürfnissen besser gerecht werden, hat man Spezifikationen aufgestellt, welche die notwendigen Forderungen und Testverfahren enthalten.
Die FDI-Spezifikation Nr. 4 beschäftigt sich mit Gußwachsen, die innerhalb und außerhalb des Mundes verarbeitet werden. Sie unterscheidet demnach:
I. Gußwachse für das direkte Verfahren
II. Gußwachse für das indirekte Verfahren.
Wesentliche Forderungen dieser Spezifikation sind, daß das Wachs beim Erweichen nicht blättrig wird, daß es unter angegebenen Bedingungen nicht splittert und möglichst rückstandslos bei 500° C verdampft.
Für die plastische Verarbeitung der Gußwachse sind die Flow-Werte von Bedeutung. Während für im direkten Verfahren verarbeitete Wachse der Flow bei 40° C nicht mehr als 20% betragen soll, ist für Wachse im indirekten Verfahren ein Flow von mindestens 50% notwendig.

Diese Forderungen sind wohl darin begründet, daß das Wachs nahe der Mundtemperatur nur beschränkt verformbar sein soll, um Deformierungen beim Abheben zu verhindern; andererseits soll die Verarbeitungstemperatur außerhalb des Mundes nicht unnötig hoch sein, um die thermische Wachskontraktion gering zu halten. Für direkt verarbeitete Wachse enthält die Spezifikation auch Angaben zur linearen Wärmeexpansion, die von 25°C - 30°C nicht mehr als 0,2% betragen sollte. Für Gußwachse die außerhalb des Mundes verarbeitet werden, fehlen solche Angaben.
REHBERG hat einige in der Literatur beschriebene und auch in der Spezifikation enthaltene Testverfahren überprüft und mit neueren anderswertig bewährten Prüfmethoden verglichen; dabei stellte er fest, daß aus den herkömmlichen Fließkurven wenig über die Eigenschaften der Gußwachse herauszulesen ist. Die Verformungskurven, die er mit dem Hoeppler'schen Konsistometer erzielte, geben aber das plasto-elastische Verhalten während und nach der Verformung gut wieder.
Einen Fortschritt bezüglich der Identifizierung und Überprüfung der Reinheit einer Wachssorte stellen nach OHASI (73) Abkühlungskurven, die auf der Ordinate die jeweilige Temperatur und auf der Abszisse die Temperaturveränderung pro Zeiteinheit enthalten, dar.
CRAIG (8) empfiehlt eine Klassifikation der Wachse nach Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften, nicht nach ihrer Herkunft.
Wir möchten diese Forderung voll unterstützen, denn es scheint wesentlich sinnvoller mit chemischen und physikalischen Daten als mit Fabrikgeheimnissen zu experimentieren.

2123 Verarbeitung der Gußwachse:

21231 Wachsverarbeitungstechniken:

Um ein Wachsmodell zu erhalten, das möglichst exakt am Präparationskörper anliegt, und das frei von inneren Spannungen

ist, wird eine Vielzahl von mehr oder weniger unterschiedlichen Verarbeitungstechniken empfohlen.
PRICE zit. (102) schneidet Wachseinlagen für MOD-Kavitäten mit heißen Instrumenten durch, paßt beide Hälften an und läßt flüssiges Wachs in die Fuge fließen, um ein Aufbiegen der approximalen Anteile durch innere Spannungen zu verhindern.
SOLBRIG (104) wendet sich ebenfalls gegen unnötiges Kneten oder Druck beim Einbringen des Wachses in die Kavität. Er versucht dem bearbeiteten Wachs durch Erwärmen bis zu seiner oberen Bearbeitungstemperatur die inneren Spannungen zu nehmen; dies kann durch Bespritzen mit heißem Wasser oder durch Einführen eines heißen Instrumentes geschehen.
SCHUBERT (94) empfiehlt, um die Kontraktion des Wachses herabzusetzen, die Verarbeitung desselben in plastischem Zustand und dessen Erhärtung unter Druck; das Wachs wird dabei im Wasserbad möglichst gleichmäßig erwärmt.
COLEMANN zit. (102) glaubt dagegen elastische Spannungen vermeiden zu können, wenn das Wachs möglichst hoch erhitzt aber nicht überhitzt wird.
MAVES (64) und LASATER (60) projezierten die Verformung kleiner Wachsmodelle in einem Wasserbad mit veränderlicher Temperatur auf einen Wandschirm. Sie kamen auf Grund ihrer Versuche zu dem Ergebnis, daß unter Druck in die Kavität gebrachtes Wachs am wenigsten zur Verformung neigt. Die ideale Erhitzung des Wachses auf Arbeitstemperatur soll indirekt erfolgen.
Auch NELKE (69) fordert, daß eine Kontraktion des Wachsmodelles vermieden werden sollte, und lehnt deshalb auch eine nachträgliche Erwärmung ab. Er empfiehlt ebenfalls Eindrükken des erweichten Wachses in die Kavität, da plastisch verarbeitetes Wachs weniger kontrahiert.
PHILLIPPS (77a) stellte fest, daß
1) Bei jedem Formen von Wachs auch bei höchster Verarbei-

tungstemperatur innere Spannungen entstehen und daher immer mit einem Verziehen gerechnet werden muß.

2) Bei einem Formen bei ungleichmäßiger Temperatur (Tropftechnik, Tauchtechnik) sich stärkste Verziehungen bemerkbar machen, und ungleichmäßiges Abkühlen zu Spannungen führt.
3) Das Verziehen allmählich eintritt, wobei es bei tieferer Lagertemperatur geringer in Erscheinung tritt.

BONSACK (5) glaubt nach Durchsicht der Literatur sagen zu können, daß die Resultate bei gegossenem und gepreßtem Wachs gleich sind.
SUFFERT (106) erwärmte das Wachs im Schmelztiegel, goß es in die Form und ließ es unter gleichmäßigem Druck erstarren. Eine 24-stündige Lagerung sollte die Wachsspannungen ausscheiden.
Auch TITKEMEYER (109) verwendet 15 Minuten vor dem Modellieren auf 65° C erwärmtes und entspanntes Wachs, das unter leichtem Druck in die Hohlform eingebracht wird.
Ebenso hält DÜPPERS (16) das Einpressen des Wachses in die Kavität für die geeignetste Methode bei der Inlay-Herstellung. Eine der bedeutendsten Arbeiten zur Wachsverarbeitung stammt von FUSAYAMA (25). Er verglich unter Verwendung zweier Wachssorten des normalen Kerr-Inlaywachses und eines rosa Paraffinwachses vier verschiedene Verarbeitungsverfahren, nämlich die Fließ- und Preß-Technik, die Fluß-Technik, die wiederholte Auftrage-Technik und die Tauch-Technik mit der Preß-Technik.
Dabei ergab sich, daß:

1) Mit Paraffinwachs Muster von größerer Genauigkeit als mit Inlaywachs erzielt wurden, da bei Paraffinwachs die Verarbeitungstemperatur niedriger liegt.
2) Die Preßtechnik die genauesten Resultate ergab.
3) Die mit der Preßtechnik geformten Muster sich weniger verzogen.

4) Mit der Preßtechnik hergestellte U-Muster sich verzogen wenn sie im Wasserbad bei 38° C aufbewahrt wurden.

Er empfiehlt deshalb für die indirekte Technik die Verwendung von Paraffinwachs, das unter Druck modelliert und gehalten wird bis es vollständig erhärtet ist. Das Wachsmodell soll sobald als möglich eingebettet werden.
KUBASCH (55) erwähnt bei der indirekten Technik die Verwendung von Plattenwachsstreifen, die im Wasserbad erweicht und an der Stoßstelle verschweißt werden.
OVERDIECK (76) weist wohl mit Recht darauf hin, daß die indirekte Erwärmung des Wachses im Wasserbad für die Praxis zu umständlich ist und allgemein über offener Flamme erweicht wird.
WINDISH (116) empfiehlt zum Modellieren von Vollkronen die Tauchmethode, da zu starkes Erhitzen und zu starker Druck beim Modellieren zu inneren Spannungen in der Wachsform führen. Er steht hiermit im Gegensatz zu den Untersuchungen von FUSAYAMA.
HEHRING (39) erwärmt das Gußwachs im Wasserbad bis auf 70° C, gießt es in den Hohlraum und läßt es mittels eines Metallstempels unter Handdruck erhärten.
VERGE (111) berichtet neuerdings über ein Druckgußverfahren, das angeblich bessere Resultate als die von GUSTAVSON und FUSAYAMA beschriebenen Verfahren der Wachsverarbeitung unter Druck, bringt.
Zusammenfassend glauben wir mit SCHUBERT (94), NELKE (69), SUFFERT (106), TITKEMEYER (109), DÜPPERS (16), FUSAYAMA (25), HEHRING (39) und VERGE (110) sagen zu können, daß unter Druck verarbeitetes Wachs geringere innere Spannungen enthält und eine exaktere Wiedergabe des Präparationsmodelles ermöglicht, als ohne Druck verarbeitetes Wachs. Die Frage, ob sich das unter Druck verarbeitete Wachs in flüssigem oder plastischem Zustand befinden soll, wird von FUSAYAMA bei Verwendung eines weichen Paraffinwachses zu

Gunsten der plastischen Verarbeitung (press molding) beantwortet.
Die Untersuchungen von VERGE müssen für den Fall einer Vollgußkrone erst noch überprüft werden, da sie an massiven zylindrischen oder quaderförmigen Wachsprüfkörpern durchgeführt wurden.
PHILLIPPS (77a) hat darauf hingewiesen, und FUSAYAMA hat auch für die Preßtechnik gezeigt, daß innere Spannungen nach jedem Formen von Wachs entstehen. Um diese auszugleichen, empfehlen verschiedene Autoren eine Entspannung der Wachsmodelle.

21232 Entspannung der Wachsmodelle:

SOLBRIG (104) hat als einer der ersten Autoren erkannt, daß dem Wachs nach seiner Verarbeitung ein gewisser Grad an Elastizität innewohnt, den er durch Bespritzen oder Spülen mit heißem Wasser ebenso wie durch Einführen eines heißen Instrumentes zu beseitigen suchte.
SPANNER (105) sieht die Bedeutung der Wachsentspannung vor allem im Zusammenhang mit der heute nicht mehr geübten Wachsexpansionsmethode. Das fertige Wachsmodell wird, um spätere Veränderungen auszuschalten, im Wasserbad von 40° bis 50° C auf dem Arbeitsmodell entspannt.
KUBASCH (55) begnügt sich mit einem Wasserbad von 30° C und glaubt, daß damit das Wachsmodell zum größten Teil von seinen inneren Spannungen befreit ist, während FUSAYAMA (25) eine Wassertemperatur von 38° C verwendet. Die richtige Entspannungstemperatur läßt sich nach SPANNER (105) dadurch ermitteln, daß man Wachs in kleine Streifen schneidet, diese im Wasserbad verschiedene Temperaturen annehmen läßt und dann zu kleinen Ringen biegt. Wenn das Wachs nicht völlig entspannt ist, wird der Ring beim weiteren Erwärmen aufgehen.

21233 Lagerung der Wachsmodelle:

Da die Entspannung der Wachsmodelle relativ aufwendig ist,

versuchte man sie durch entsprechende Lagerung oder sofortige Einbettung zu umgehen.
DÜPPERS (16) empfiehlt trotz Wachsentspannung sofortige Einbettung, da sich auch eine kurze Lagerzeit ungünstig auf die Wachsmodelle auswirkt.
WINDISH (116) fordert ebenfalls baldmöglichste Einbettung des Wachsmodelles, während VERGE (111) das Problem der Volumenkonstanz durch Aufbewahren der Wachsmodelle im Kühlschrank teilweise lösen konnte; trotzdem hält auch er die sofortige Einbettung für das beste Verfahren.
BONSACK (5) berichtet, daß die Deformation der Wachsmodelle um so größer ist, je näher die Wartetemperatur bei derjenigen liegt, bei der das Wachs verarbeitet wurde.
Wachse die bei 10° C aufbewahrt wurden, zeigten sogar nach 24 Stunden nur eine schwache Deformation.
Bei einer Aufbewahrungstemperatur von 0° C ergaben sich noch bessere Ergebnisse als bei 10° C. Er fordert deshalb, wenn eine Aufbewahrung bei 10° C nicht möglich ist, sofortige Einbettung.
Jede Lagerung der Wachsmodelle gilt nach den Hinweisen, die wir aus der Literatur entnehmen können, als problematisch. Der Zeitraum zwischen Fertigstellung des Wachsmodelles und der Einbettung muß also möglichst klein gehalten werden.

21334 "Entfettung" der Oberfläche der Wachsmodelle:

Wie anfangs erwähnt, sind unsere Gußwachse den Fetten chemisch eng verwandt. Sie lassen sich somit von einem wässrigen Einbettmassebrei nicht benetzen. Wenn wir heute von "entfetten" sprechen, so meinen wir im wesentlichen, benetzbar machen.
Wir unterscheiden deshalb nach WALTER (11):
1) Echte Entfettungsmittel, das sind organische Lösungs-

mittel wie Spiritus, Azeton, Benzol, Chloroform etc.

2) Netzmittel, Detergentien oder Tenside (HENNING (41)). Es handelt sich dabei um grenzflächenaktive Stoffe, die chemisch Alkyl-, Arylsulfonate, -sulfate oder Ester höherer Fettsäuren sind. Sie besitzen eine hydrophile Gruppe, die für die Wasseranlagerung verantwortlich ist und eine hydrophobe oder lipophile Gruppe, die sich leicht an Fette und Wachse anlagert (Walter (11)).

Bei der Verwendung organischer Lösungsmittel ist zwar mit einer Lösung anhaftender Fette zu rechnen, dabei muß aber berücksichtigt werden, daß das anschließende Verdunsten der Lösungsmittel die Oberfläche anrauht WALTER (11) und, daß nach HAN (36) mit einem Wärmeentzug von 10° C am Wachsmodell gerechnet werden muß.

SPANNER (105) lehnt deshalb die Verwendung von organischen Lösungsmitteln ab und empfiehlt Abpinseln mit warmer Soda- oder Seifenlösung.

OVERDIEK (76) empfiehlt zur Beseitigung anhaftender Ölreste, grüne Seifen- oder verdünnte Reilösung, die anschliessend abgespült werden soll.

HENNING (41) gibt zu bedenken, daß Spülmittel Fette nicht lösen können, diese müssen vielmehr emulgiert und abgespült werden. Die wässerigen Netzmittelreste verdampfen nicht und könnten, wenn dieses Wasser unvollständig von der Einbettmasse absorbiert wird, zur Beeinträchtigung der Paßgenauigkeit führen.

HENNING fordert Netzmittel, die einen fettlösenden und emulgierenden Zusatz haben und die sich in einer hauchdünnen monomolekularen Schicht auf die Wachsmodelle auftragen lassen, was unter Verwendung eines Pinsels nicht möglich ist. Er glaubt dieses Problem mit der Spray-Technik lösen zu können.

GRASSL (34) kommt schließlich zu dem Ergebnis, daß die Verwendung von Netzmitteln für die Verbesserung der Oberfläche

von Güssen nur geringe Bedeutung besitzt.
Seine Ansichten stehen im Widerspruch zu denen von OVERDIEK (76), der Entfettung und Aufhebung der Oberflächenspannung fordert, und HENNING (41), der beides mit Hilfe einer monomolekularen Tensideschicht zu erreichen versucht.

213 Einbettmassen:

2131 Begriff:

Entsprechend den Anforderungen der ADA-Spezifikation Nr.2 versteht man unter Gußeinbettungsmassen für zahnärztliche Goldlegierungen ein Pulver, welches im wesentlichen aus Gips und Siliziumanteilen oder ähnlichen Substanzen besteht. Mit Wasser in einem bestimmten Verhältnis gemischt, sollen sie für ausreichend befunden werden, nach Erhitzen in üblicher Weise Wachsformen zahnärztlicher Wiederherstellungsarbeiten im Gußverfahren in Metall überführen zu können.
In Anlehnung an HEHRING (40) und unter Berücksichtigung der neueren zementgebundenen Massen, könnte man den Begriff Gußeinbettungsmassen für dentale Goldlegierungen allgemeiner definieren mit: Stoffgemischen die aus Siliziumbestandteilen und einem Bindemittel bestehen und die mit einer bestimmten Menge Flüssigkeit angerührt, über einen gewissen Zeitraum plastisch verarbeitbar sind und dann abhängig von der Art des Bindemittels zu einer auch bei höheren Temperaturen feuerfesten Masse erstarren. Sie sollen "rückstandslos" ausbrennende Wachs- oder Kunststofformen zahnärztlicher Wiederherstellungsarbeiten im Gußverfahren unter gewissem Ausgleich der Metallkontraktion in Metall überführen können.

2132 Einteilung der Einbettmassen:

Da wir uns im Rahmen dieser Arbeit nur mit Gußeinbettungsmassen beschäftigen, genügt es auf keramische Einbettmassen mit hoher Feuerfestigkeit und auf Löteinbettungsmassen mit geringer thermischer Expansion hinzuweisen.
Die Gußeinbettungsmassen werden nach der ADA-Spezifikation Nr.2 in drei Gruppen eingeteilt:

I. thermisch expandierende Massen für Inlays
II. hygroskopisch expandierende Massen für Inlays
III. thermisch expandierende Massen für Modellguß

Nachdem hygroskopisch expandierende Massen immer mehr an Bedeutung verlieren, teilen wir die Gußeinbettungsmassen nach Art des Bindemittels ein in:

1) Gipsgebundene Massen für den Edelmetallguß
2) Zementgebundene Massen für Gold und Chrom-Kobalt-Legierungen
3) Silikatgebundene Massen für Chromkobalt-Legierungen.

2133 Zusammensetzung der Gußeinbettungsmassen:

Zum Verständnis der chemisch-physikalischen Eigenschaften ist die Kenntnis der Zusammensetzung unserer Gußeinbettungsmassen von erheblicher Bedeutung; sie ist zumeist Fabrikgeheimnis, weshalb wir besonders bei zement- und silikatgebundenen Massen auf die wenigen Literaturhinweise angewiesen sind.
Nach KNISCHEWSKI (50) und HEHRING (40) enthalten Massen zum Guß von Chrom-Kobaltlegierungen als feuerfeste Bestandteile Quarz bzw. dessen Modifikationen und Tetraäthylsilikat+Alkohol als Bindemittel.
Die zementgebundenen Massen, wie Aurovest und DeguvestHFG, die auch für den Guß von Goldlegierungen gut geeignet sind(SCHNELL (93)),enthalten als feuerfeste Bestandteile

in der Hauptmenge Quarz und in der Nebenmenge Christobalite. HAAG (35) konnte mittels der Fluoreszenzanalyse und der Phasenanalyse weiterhin feststellen, daß der pulverige Bestandteil zusätzlich größere Mengen von Calzium (evtl. als Calziumsilikat), geringere Mengen Phosphat, Titan, Eisen sowie Ammoniumphosphat, Magnesiumoxyd und Graphit enthielt.

In der Flüssigkeit konnten hauptsächlich Silizium, geringe Mengen Blei, Titan und Eisen sowie Spuren von Kalium, Calzium und Chlor nachgewiesen werden. Es handelt sich dabei vermutlich um hochgesättigte, stabilisierte bzw. organomodifizierte Kieselsäuresole. Der Abbindeprozeß dieser Massen beruht darauf, daß ein Metalloxyd (Magnesiumoxyd) in Verbindung mit Wasser nach folgender Gleichung mit einem sauren Phosphat reagiert (HAAG (35), SCHNELL (93)):

$$MgO + R\text{-}H_2PO_4 \rightleftharpoons Mg\text{-}R\text{-}PO_4 + H_2O$$

Das Radikal R wird dabei durch ein lösliches Phosphat (Ammonium oder Natriumphosphat) dargestellt.

Nach Angaben der Hersteller von Aurovest handelt es sich dabei um die Reaktion zwischen sauer reagierenden Phosphaten und basischen Erdalkalien.

Als wichtigste Gruppe können wir die gipsgebundenen Einbettmassen bezeichnen. Sie bestehen nach HEHRING (40), GERLACH (29,30), FEINMANN (20), HÖFER (42), KNISCHEWSKI (50) aus:

1) Feuerfesten Bestandteilen, die als Quarzsand, Cristobalite oder Tridymit vorliegen.
2) Bindenden Bestandteilen, dem Gips, der als Halbhydrat ($CaSo_4 \cdot 1/2\ H_2O$) vorliegt.
3) Zusätzen, die die Abbindezeit, Abbindeexpansion und thermische Expansion beeinflussen, sowie Farbzusätzen, die zur Kennzeichnung dienen (ca. 2%).

Das günstigste Mischungsverhältnis zwischen Gips und Quarz beträgt 1:3 (GERLACH (30), OESCHGER (71), ENDELL (18)). Auf eine Besprechung der feuerfesten Bestandteile und der Quarzumwandlungen wollen wir verzichten und verweisen auf die neueren Arbeiten von HÖFER (42), GEHRE (27), PRENZ (78) und FINKBEINER (21) sowie auf die entsprechenden Diagramme von RIEKE zit. (50), COSMANN zit. (19) und ZSCHIMMER zit. (42).
An Zusätzen, die die thermische Expansion steigern, sind nach HEHRING (40) Natriumchlorid, Kaliumchlorid und Lithiumchlorid zu nennen.
Der Gips und Zusätze, die die Abbindeexpansion beeinflussen, werden später noch ausführlich behandelt.

2134 Chemisch-physikalische Eigenschaften der Einbettmassen:

Zum Ausgleich der Gußkontraktion unserer Edelmetallegierungen nutzen wir die Expansionsfähigkeit der Einbettmassen aus. Wir unterscheiden nach FALCK-WEIKART (19) und HEHRING (40) 2 Phasen der Expansion, wobei wir entgegen KNISCHEWSKI (50) die Umwandlungs-Expansion des Quarzbestandteiles zur thermischen Expansion rechnen:

1) Abbinde-, Kalt- oder Erstarrungsexpansion
2) Thermische Expansion

Die Abbindeexpansion wird bei allen Einbettungsmassen durch das Bindemittel (meistens Gips) hervorgerufen. Der Abbindevorgang ist als exothermer chemisch-physikalischer Vorgang der Hydratation des Hemihydrates anzusehen und damit zu einem erheblichen Teil von der Qualität des vorliegenden Halbhydrates, von Zusätzen und den gewählten Versuchsbedingungen abhängig. Er geht mit einer Volumenvergrößerung des Einbettmassebreies einher, die durchschnittlich einen Betrag von 0,1%-1,0% ausmacht (HEHRING (40),

DOLDER (12), KNISCHEWSKI (50)). Nach SKINNER zit. (20) reagiert das Halbhydrat des Gipses mit Wasser unter Wärmeabgabe nach folgender Gleichung:

$$2CaSO_4 \cdot 1/2\ H_2O \xrightleftharpoons{H_2O} 2CaSO_4 \cdot 2\ H_2O + 3900\ Cal/gr.$$

Die Ursache der Abbindeexpansion bei zementgebundenen Massen muß in der Gleichung $MgO + R\text{-}H_2PO_4 \rightleftharpoons Mg\text{-}R\text{-}PO_4 + H_2O$ zu suchen sein; die Einzelheiten sind jedoch auf Grund des komplizierten Aufbaues dieser Massen noch nicht geklärt.

Die thermische Expansion wird beim Vorwärmen der Einbettmassen erzielt; dabei verhalten sich ihre Hauptbestandteile genau entgegengesetzt. Der Gips kontrahiert nach HEHRING (40) und OESCHGER (71) bereits bei 100° C, während KNISCHEWSKI erst ab 300° C von einer Kontraktion spricht. Die Quarzbestandteile, am stärksten Cristobalite dehnen sich beim Erhitzen aus. Der Übergang des α-Cristobalites in β-Cristobalite ist nach FALCK-WEIKART (19), KNISCHEWSKI (50), ENDELL (18), SWENEY (107), OVERDIECK (76), DOLDER (12), GEHRE (27) und HEHRING (40) mit einer Wärmedehnung von 1,1% - 2,8% vergesellschaftet und findet bei einer Temperatur von 200° - 275° C statt; man spricht deshalb von Umwandlungspunkten. Diese treten bei allen Quarzmodifikationen unter mehr oder weniger starker Volumenvergrösserung auf. Bei zementgebundenen Einbettmassen ist ein antagonistisches Verhalten zwischen Bindemittel und Quarzkomponente beim Erhitzen nicht bekannt. Nach HAAG (35) geht das instabilere Orthophosphat in die thermostabilere Pyroform über.

2135 Der Abbindevorgang:

Nach SCHACKE (91) und HÖFER (42) läßt sich der Abbindeprozeß in einen

Lösungs-
Hydratations- und
Erstarrungsvorgang

einteilen.

Dementsprechend beobachten wir unter dem Mikroskop, wenn wir etwas Halbhydrat und Wasser auf einem Objektträger vermischt haben, daß die anfangs opak aussehenden Gipsteilchen allmählich durchsichtig werden; zum Teil zeigen sie an ihrer Peripherie Auflösungserscheinungen oder verschwinden ganz. Weiterhin scheiden sich an den verschiedenen Gipsteilchen und besonders in der umgebenden Flüssigkeit monokline Dihydratnadeln ab. Der Lösungsvorgang ist von einer Temperatur- und Volumenverminderung der Mischung begleitet und wird sehr rasch von dem Vorgang der Hydratation abgelöst.

Das Hemihydrat ist nach LYON (63) in Wasser leichter löslich (0,65g/100 ml H_2O) als das Dihydrat (0,21g/100 ml H_2O bei 23,5 C°) und man erhält, wenn man Gips mit Wasser mischt, bald eine nahezu gesättigte Lösung an Halbhydrat und eine übersättigte Lösung an Dihydrat. Da das Dihydrat schnell aus der Lösung ausfällt, kann wieder neues Halbhydrat gelöst werden und der Kristallisationsvorgang läuft weiter, bis die ausgefallenen Kristalle sich so eng verflochten haben, daß es zu einer Verfestigung kommt. Von GLASENAPP zit. (42) führt die Erhärtung ebenfalls auf die Verfilzung und Verwachsung der Dihydratkristalle zurück. SCHACKE schildert den Abbindevorgang unter Berücksichtigung der Arbeiten von Le Chatelier, Mendheim, von Glasenapp und Cavazzi zusammenfassend.

Beim Einstreuen und Anrühren des Gipses löst sich das Hemihydrat unter Volumenverringerung, dem das Stadium der Wasseraufnahme unter Wärmeabgabe folgt; aus der an Dihydrat übersättigten Lösung scheidet sich dasselbe als Gel ab, aus welchem schließlich das Dihydrat unter Volumenzunahme auskristallisiert.

Beim Abbinden des Gipses treten regelmäßig Wärmeentwicklung, manchmal Schwitzen des Gipses und eine Endexpansion auf. Während das Schwitzen des Gipses nur in manchen Fällen und zwar vor allem gegen Ende der Abbindezeit und bei erhöhter Reaktionsgeschwindigkeit (Beschleuniger) beobachtet wurde, tritt beim Abbinden immer eine Wärmeentwicklung auf. Sie ist nach SCHACKE auf den exothermen Vorgang der Hydratation zurückzuführen, wobei das freiwerdende Wärmequantum von der Menge der beteiligten Massen abhängt. Auch erhöhte Abbindegeschwindigkeit soll zu erhöhter Wärmeentwicklung führen (KÖRBER (52)). Eine Erklärung dafür sucht MENDHEIM zit. (42) zu geben, indem er annimmt, daß die beim Erstarren sich bildenden Kristalle sich in einer bestimmten Richtung zu entwickeln suchen. Dabei finden sie aber an den anders gelagerten Flächen der in Lösung gehenden rhombischen Kristalle des Hemihydrates Widerstand und müssen sich deshalb in der Richtung ihrer Entwicklung gestört, gegenseitig durchdringen und verwachsen, wobei sie ihre ursprüngliche Kristallform verlieren. Infolge der bei diesem Prozeß stattfindenden gegenseitigen Reibung der verschiedenen Kristalle entsteht Wärme, die umso größer ist, je schneller der Abbindeprozeß vor sich geht.
Das für uns bedeutsamste Phänomen, das der Gips beim Abbinden zeigt, ist seine Expansion. Nach VAN'T HOFF zit. (63) hätten wir eine Volumenabnahme von 7,11%-10,0% zu erwarten, da das molare Volumen des Dihydrates ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 74,2 ml bei einer Dichte von $\varrho = 2{,}32$ beträgt und das molare Volumen des Halbhydrates ($CaSO_4 \cdot 1/2\ H_2O$) 55 ml bei einer Dichte von $\varrho = 2{,}75$ ausmacht, wobei 27 ml Wasser ($1\ 1/2\ H_2O$) zum molaren Volumen des Halbhydrates zugerechnet werden müssen. In der Praxis finden wir jedoch eine Ausdehnung, die mit Einsetzen der Hydratation beginnt und ihr Maximum mit Ende der Abbindezeit erreicht hat (SCHACKE (91)).

VAN'T HOFF hat die Ursache der unerwarteten Expansion in der Aufnahme überschüssigen Wassers, das nicht zur Hydratation benötigt wird, gesehen.
CAVAZZI zit. (42) versucht die Volumenzunahme über das Vorhandensein des Gipsgels zu erklären. Das stärker wasserhaltige Gipsgel soll bei der Bildung des kristallinen Dihydrates freies Wasser abgeben, das für die Volumenzunahme verantwortlich ist.
Heute finden wir eine große Zahl von Theorien und Beobachtungen, die das Phänomen "Abbindeexpansion" vor allem auch unter hygroskopischen Bedingungen zu klären versuchen.
DEGNI zit. (42) führt die Abbindeexpansion auf das kristalline Wachstum des ausfallenden Gipses, das sich in poröser Struktur bei Volumenvergrößerung manifestiert, zurück.
Die hygroskopische Expansion beruht auf einem verstärkten Kristallwachstum, welches durch eine längere Dauer des Abbindevorganges ermöglicht wird. Inerte Substanzen, wie Silizium, Eisen und Talkum erhöhen die Expansion; weiterhin ist die entstehende Menge Dihydrat für die Größe der Expansion verantwortlich. Man versuchte deshalb die Einbettmasse mit Zusätzen zu versehen, welche die Erhärtung verlangsamen und den Kristallisationsprozeß verlängern.
LYON (63) führt die Abbindeexpansion ebenfalls auf das Kristallwachstum der ausfallenden Gipskristalle zurück, was eine poröse Struktur mit größerem Volumen zur Folge hat; dabei kann sich die Expansion solange entfalten, bis die Masse genügend fest wird, um einer weiteren Verformung zu widerstehen. Die hygroskopische Expansion ist nichts anderes als eine verstärkte Abbindeexpansion und rührt von einem verstärkten Kristallwachstum innerhalb des Zeitraumes her, indem sich die Masse in einem halbfesten Zustand befindet. LYON sieht seine Theorie in der Wirkung chemisch inerter Substanzen bestätigt, die eine Auflockerung der

der Struktur, längeres Kristallwachstum und bessere Wasserdurchdringung der Masse bewirken sollen. Die Wasserzugabe führt zu vollständigerer Hydratation und Auflockerung der Struktur und damit zu erhöhter Expansion. RYGE (90) hat festgestellt, daß Flüssigkeiten außer Wasser wie zum Beispiel Glyzerin, Alkohol und Transformeröl eine hygroskopische Expansion bewirken können. Er führt die Auflockerung der Struktur auf die Kapillaritätswirkung zurück, durch die der Flüssigkeitsüberschuß in die winzigen Zwischenräume eingesogen wird, die sich in der Einbettmasse während dem Kristallisationsprozeß bilden. Die Dicke des Oberflächenbelages bei Füllstoffen und Gipskristallen wird vergrößert und die Kristalle auseinandergedrängt, wodurch vermehrte Expansion zustandekommt. Die Größe der Expansion ist direkt proportional zur Oberflächenspannung.
MAHLER (65) mißt der Oberflächenspannung des Anrührwassers große Bedeutung für die hygroskopische Expansion bei. Er glaubt, daß die Abnahme der wässerigen Phase beim Abbinden eine kompressive Kraft auf die wachsenden Gipskristalle ausübt und ihr Wachstum hemmt. Gibt man also während des Abbindens Wasser zu, so wird die wässerige Phase verlängert und die kompressive Kraft herabgesetzt. Die Folge davon ist eine erhöhte Expansion, die auch bei Zugabe von Netzmitteln zum Anrührwasser auftritt.
MAHLER (66) bezeichnet die hygroskopische Abbindeexpansion als das mögliche Expansionsmaximum und damit gleich einer Abbindeexpansion, die durch die Oberflächenspannung nicht gehemmt wurde.
DREYER-JØRGENSEN (15) glaubte den Grund der Abbindeexpansion in einem Überdruck, der in dem engen Spalt zwischen zwei wachsenden Kristallen aufkommt, gefunden zu haben. Dabei sollte die Höhe des Überdruckes und entsprechend die Abbindeexpansion umgekehrt proportional zur Summe der

Spalt-Peripherien pro Volumeneinheit Dihydrat, direkt proportional zur Viskosität dieser Flüssigkeit und zur Abbindegeschwindigkeit sein. DREYER-JØRGENSEN hat dieses hypothetische Modell selbst widerlegt und glaubt, daß die Abbindeexpansion auf thermodynamische Bewegungen an den Grenzflächen zwischen den Gipskristallen zurückzuführen ist; solche Bewegungen können eine Diffusion von Molekeln und Ionen in das weniger regelmäßige Grenzflächengitter hinein mit sich führen und so dasselbe expandieren. An Hand kristallographischer Untersuchungen stellte er fest, daß die Abbindegeschwindigkeit positiv korrelat mit der Zahl der Kristalle pro Raumeinheit Gips und mit der Summe der Endflächen-Peripherien ist.

LAUTENSCHLAGER (51) stellte an Hand von Röntgendiffraktionsstudien fest, daß sich im abgebundenen Gips nicht von Wasser eingenommene Mikroporen befinden, deren Gesamtvolumen im dicker angerührten Gemisch größer ist. Sie sind für die Expansion verantwortlich und entstehen durch gegenseitige Verschiebung der in Bildung befindlichen Dihydratkristalle.

Mit den Untersuchungen LAUTENSCHLAGERS ist jedenfalls geklärt, daß überschüssiges Wasser nicht für die Abbindeexpansion verantwortlich ist. Damit sind die Theorien von VAN'T HOFF und CAVAZZI bezüglich der Abbindeexpansion nicht mehr zutreffend.

Weiterhin kann gesagt werden, daß die Ursache der Expansion im Kristallwachstum zu suchen ist (LYON (63), HÖNIG (42)). Nicht endgültig geklärt ist die Ursache der erhöhten Expansion unter hygroskopischen Bedingungen. Wahrscheinlich handelt es sich um eine Auflockerung des Gefüges der abbindenden Einbettmasse, sei sie durch Kapillaritätswirkung RYGE (90) oder durch verminderte Oberflächenspannung des Anrührwassers MAHLER (65) hervorgerufen.

2136 Beeinflußbarkeit der Abbindeexpansion:

Wir finden in der Literatur eine große Zahl von verschiedenen Werten für die Abbindeexpansion gipsgebundener Einbettmassen. Diese haben ihre Ursache in zahlreichen Faktoren, welche die gemessenen Abbindeexpansionswerte beeinflussen und lassen sich folgendermaßen einteilen:

1' Zusammensetzung der Massen:
11' Menge, Art und Lagerung des verwendeten Hemihydrates
12' Menge und Feinheit des zugesetzten SiO_2

2' Verarbeitung der Massen:
21' Wasser/Pulver Verhältnis
22' Temperatur des Anrührwassers
23' Anrührdauer und Geschwindigkeit
24' Einbettungsverfahren

3' Chemische Zusätze:
31' Acceleratoren
32' Inhibitoren
33' Chemisch inerte Stoffe

4' Hygroskopische Bedingungen:

5' Besondere Versuchsbedingungen:
51' Hemmende Kräfte:
511' Muffelwerkstoff, Trogauskleidung
512' Modellwerkstoff
513' Meßdruck
52' Meßmethode:
521' Meßrichtung
522' Lage des Modelles innerhalb des Gußringes
523' Form des Probekörpers

1' Nach FALCK-WEIKART (19) sind bei der industriellen Herstellung der Werkstoffe Schwankungen bei den einzelnen Herstellungspartien unvermeidlich. DREYER-JØRGENSEN zit. (23) hat bei Amerikanischen Einbettmassen ebenfalls Unterschiede von Partie zu Partie gefunden. FLAUMENHAFT (23) erklärt die Unterschiede damit, daß die Rohstoffe aus der Natur kommen und daß die Fundstätten nicht konstant sind.
Wenn wir von der Zusammensetzung der Massen ausgehen, müssen wir die beiden Grundbestandteile Gips-Halbhydrat und Siliziumdioxyd gesondert betrachten.

11' Nach KNISCHEWSKI (50) und KÖRBER (52) unterscheiden wir beim Brennen des Gipses trockene und nasse Brennverfahren. Wir erhalten beim ersteren das sogenannte β-Halbhydrat und beim letzteren das α-Halbhydrat. Das β-und α-Hydrat unterscheiden sich voneinander dadurch, daß das α-Halbhydrat aus neugebildeten kleinen Kristallnadeln besteht, während die Gipskristalle beim β-Halbhydrat schuppige oder flockige Form haben, stark aufgelockert sind und das Kristallgitter zerstört ist. Das α-Halbhydrat ist mehr löslich als das β-Halbhydrat und benötigt deshalb weniger Wasser zum Anmischen.
Unter Plaster versteht man nach KNISCHEWSKI (50) die schnell abbindenden Gipsumwandlungen also das Halbhydrat und das Halbanhydrit, während "hydrocal" in der amerikanischen Literatur für α-Halbhydrat verwendet wird (FEINMANN (20)). Nach HEHRING (40) und SCHUBERT (96) ist die Abbindeexpansion einer gipshaltigen Masse umso größer, je höher der Gipsanteil der Einbettmasse ist. Sie wird weiterhin durch die zugesetzte Gipsart beeinflußt.
Nach KÖRBER (52) und KNISCHEWSKI (50) zeigt β-Halbhydrat, wie es im Alabastergips vorliegt, eine Abbindeexpansion von 0,4%-0,6% linear, während das α-Halb-

hydrat nur eine Abbindeexpansion von 0,2% aufweist. DOCKING zit. (57) stellte dagegen fest, daß die Verwendung von Alabastergips gegenüber α-Halbhydrat die hygroskopische Expansion so sehr verringert, daß dieser für die hygroskopische Technik unbrauchbar ist.
SCHACKE (91) weist andererseits darauf hin, daß das Wasseraufnahmevermögen und damit auch die Expansion vom Alter und der Art des verwendeten Halbhydrates abhängt.
DREYER-JØRGENSEN (15) konnte an hochreinem Halbhydrat die Feststellungen SCHACKES beweisen, daß die Lagerungszeit des frisch gebrannten Halbhydrates Einfluß auf die Abbindeexpansion hat.

12' Den Einfluß des Siliziumanteils der Massen auf die Abbindeexpansion überprüfte WINTHER (117). Er stellte fest, daß eine Mischung von 1 Teil Gips und 2 Teilen Quarz eine höhere Expansion zeigte als reiner Alabastergips. Bei einem Überangebot an Sand im Verhältnis 4:1 beobachtete SOLBRIG (104) keine Expansion mehr. Andererseits stieg die Abbindeexpansion mit steigendem Gipsanteil bis zum Verhältnis 1:4.
ENDELL (18) glaubt dagegen nicht an die Bedeutung des Siliziumanteils für die Abbindeexpansion, sondern macht ausschließlich die Natur des Modellgipses dafür verantwortlich.
Nach DOCKING zit. (57) nimmt die hygroskopische Expansion mit dem Quarzanteil und der Feinheit der Quarzpartikel zu und mit der Menge des zugesetzten α-Halbhydrates ab.
LYON (63) bestätigte DOCKINGS Erfahrungen und konnte bei reinem α-Halbhydrat keine hygroskopische Expansion nachweisen, wohl aber bei Zusatz von Quarz und anderen chemisch inerten Stoffen.

2' Die Abbindeexpansion der Einbettmassen läßt sich bei der Verarbeitung ganz erheblich beeinflussen.

Während DREYER-JØRGENSEN zit. (56) glaubte nachweisen zu können, daß bereits die Verdunstung des Wassers beim Abbinden die Expansion beeinflußt, konnte KUSNER nur geringe Unterschiede bei offener und geschlossener Versuchsanordnung finden.

Von größerer Bedeutung für das Ausmaß der Abbindeexpansion ist jedoch das Wasser-Gips-Verhältnis.

21' Nach DREYER-JØRGENSEN (15) wird die Abbindeexpansion des Gipshalbhydrates um zirka die Hälfte verringert, wenn das Gips-Wasser-Verhältnis von 35g:25ml auf 22,5g: 25ml Wasser verändert wird.

FUSAYAMA (26) weiß von einer Cristobalite-haltigen Masse zu berichten, die beim Anwachsen des Wasser-Pulver Verhältnisses von 0,35 auf 0,37 eine um 0,06% verringerte Abbindeexpansion zeigt.

WAGNER (113) findet, daß Veränderungen des Mischungsverhältnisses innerhalb der Grenzen, die die gewünschte Konsistenz und Abbindezeit zulassen, die Abbindeexpansion nur in bescheidenem Umfang beeinflussen.

Zusammen mit TAEGE (108), SCHACKE (91), SHELL (100), TÜRKHEIM (110), KÖNSGEN (51), SOLBRIG (104) und SCHEU zit. (57) können wir jedoch feststellen, daß die Abbindeexpansion mit zunehmendem Wasseranteil des angerührten Gips oder Einbettmassebreies, abnimmt.

Neben der Menge des zum Anrühren verwendeten Wassers beeinflußt auch die Temperatur des Anrührwassers die Abbindeexpansion. Die Wirkung einer erhöhten Wassertemperatur ist jedoch umstritten.

22' SCHACKE (91) beobachtete bei Untersuchungen an Halbhydrat unterschiedliche Ergebnisse, kommt jedoch zu der Vermutung, daß mit zunehmender Wassertemperatur und damit verbundener Verkürzung der Abbindezeit eine Zunahme der Expansion erfolgt. Diese Vermutung wird von DREYER-JØRGENSEN (15) widerlegt, der ebenfalls die

Abbindeexpansion an Gipshalbhydrat untersuchte und dabei ausgehend von einer Wassertemperatur von 3° C eine Expansion von 0,53%-0,55% lin. erzielte, wogegen eine Wassertemperatur von 37° C nur eine Expansion von 0,30%-0,31% lin. erbrachte.

TÜRKHEIM (110) machte ähnliche Erfahrungen wie DREYER-JORGENSEN, auch er stellte eine Abnahme der Expansion bei steigender Wassertemperatur fest.

TAEGE (108) weist bei Untersuchungen an Versuchsstäbchen auf die Bedeutung steigender Wassertemperatur des Anrührwassers für die hygroskopische Expansion hin und stellt bei steigender Wassertemperatur eine erhöhte hygroskopische Expansion fest.

KÖRBER (52) und KNISCHEWSKI (50) berichten übereinstimmend von einer Erhöhung der Abbindegeschwindigkeit bei Verwendung von bis zu 40° C warmem Anrührwasser, darüber erfolgt Verzögerung. Wenn wir die Theorie LYONS (63) über den Abbindevorgang zu Grunde legen, so müssen wir bei erhöhter Abbindegeschwindigkeit mit verringerter Expansion rechnen, da das Kristallwachstum verkürzt ist und die Masse damit weniger Zeit zum Expandieren hat.

23' Was die Frage der Anrührdauer und Mischgeschwindigkeit angeht, so finden wir ebenfalls unterschiedliche Angaben in der Literatur.

Während WINTHER (117) bei steigender Anrührdauer gleichbleibende Expansion aber zu einem früheren Zeitpunkt beobachtete, findet TÜRKHEIM (110), daß die Anrührdauer direkt proportional zur Größe der Expansion ist und daß mit schnellerem Anrühren die Expansion steigt. WAGNER (113) weiß ebenfalls von erhöhter Expansion bei zunehmender Rührdauer zu berichten.

SCHACKE (91) gibt bei 60Sek. Rührdauer den 5 1/2-fachen Expansionswert wie bei 10Sek. an.

Nach DREYER-JØRGENSEN (15) hat eine Anrührzeit bis zu 90 Sek., bei 1 Woche altem Alabastergips keine Bedeutung für die Expansion. Nach 2 Minuten Rührzeit nimmt die Expansion mit dem Logarhithmus der Anrührdauer zu. DREYER-JØRGENSEN (15) erklärt die Zunahme der Expansion bei längerem Rühren mit einer materialgebundenen Zunahme der Dihydrat-Keimzahl. Für die hygroskopische Expansion weiß ASGARZADEH (1) von geringem Einfluß der Anrührzeit auf die Expansion zu berichten. Zusammenfassend dürfen wir über die Anrührdauer und Mischgeschwindigkeit sagen, daß es unabhängig vom Ausgangsmaterial, von den Versuchsbedingungen und der Rührdauer, innerhalb gewisser Grenzen (DREYER-JØRGENSEN (15)) zu erhöhter Abbindeexpansion kommt. Die Ursache muß in einer Vermehrung der Dihydratkristalle und damit auch der Mikroporen zu suchen sein (LAUTENSCHLAGER (59)).

24' Zum Thema Einbettungsverfahren, das später etwas ausführlicher behandelt wird, soll lediglich erwähnt werden, daß nach HEHRING (39) und KRÄUTLE (53) die zweizeitige Einbettung die höchsten Abbindeexpansionswerte erbringt. Bei der Vakuumeinbettung ist die Abbindeexpansion durch einen höheren Wasserzusatz verringert (PRENZ (78)), dafür ist hierbei die geringste Schwankungsbreite der Gußergebnisse gegeben (HEHRING (39)).

3' Die Auswirkung chemischer Zusätze auf die Abbindeexpansion wird in der Literatur teilweise widersprüchlich geschildert. Chemische Zusätze zu Einbettmassen werden vor allem als Acceleratoren (Beschleuniger) oder Inhibitoren (Verzögerer) der Abbindung des Gipses oder auch der Einbettmassen benutzt. Von einer Verwendung dieser Stoffe ohne zwingenden Grund wird abgeraten, da sie die Eigenschaften des Gipses und der Einbettmassen nachteilig verändern (KÖRBER (52), GERLACH

(30), SCHACKE (91)).

Als Beschleuniger sind zu nennen

nach GERLACH (30):

Sulfate $ZnSO_4$, Na_2SO_4

Chloride NH_4Cl,NaCl

Nitrate KNO_3

nach SCHACKE (76):

Natrium-Kalium-Aluminiumsalze

zbsp. $KAl(SO_4)_2$ und Silikate

nach LYON (63):

Eisensulfat

Als Verzögerer gelten:

nach GERLACH (30):

Borsäure H_3BO_3, Borax Na_2BO_4

nach SCHACKE (91):

Eisenchlorid, gelöschter Kalk

31' Die Abbindeexpansion wird nach SCHACKE (91) in steigender Menge bis zu 4% durch Kochsalz und Alaun verringert. WINTHER (117) fand bei Zusatz von Kochsalz ebenfalls verminderte Abbindeexpansion.

32' Nach TÜRKHEIM (110) läßt sich die Abbindeexpansion von Stoffen wie Calziumchlorid und Natriumsulfat, die eine sehr lange Abbindezeit bewirken, aufheben; dabei ist die Konzentration der beigemischten Stoffe von erheblicher Bedeutung.

LYON (63) erhielt durch Zugabe von Eisensulfat eine erniedrigte durch Zugabe von Natrium oder Sodiumazetat erhöhte Expansion. DREYER-JØRGENSEN (15) beobachtete dagegen sowohl bei Beschleunigern als auch bei Verzögerern eine Verringerung der hygroskopischen Expansion mit Ausnahme von $CaCl_2$ und $Ca(NO_3)_2$, wo er erhebliche Expansion feststellte.

33' Die Auswirkung chemischer Zusätze auf die Abbindeexpansion ist nicht einheitlich. Die Behauptung ENDELLS (18), daß Verzögerer die Abbindedehnung auf maximal 0,1% lin. verringern, kann nicht aufrecht erhalten werden. Beschleuniger und Verzögerer lassen sich bezüglich ihrer Wirkung auf die Abbindeexpansion nicht unterscheiden, da diese Stoffe wenigstens teilweise den chemischen Abbindeprozeß stören.
Selbst bei den genannten Stoffen die das Ausmaß der Abbindeexpansion vermindern oder erhöhen, kommt es wesentlich auf die Konzentration der zugesetzten Stoffe an.

4' Die Abbindeexpansion von Einbettmassen läßt sich experimentell durch Wasserzugabe beim Abbinden ganz erheblich steigern. Diese Erkenntnis geht zurück auf WILSON zit. (20), der beobachtet hatte, daß sich Gips durch Aufnahme von Luftfeuchtigkeit 0,044% lin. über den normalen Betrag der Abbindeexpansion hinaus ausdehnte. SCHEU (92) griff diesen Gedanken auf und konnte bei der Überprüfung mehrerer Einbettmassen durch Feuchtigkeitszugabe eine Expansionssteigerung von 0,25% bis auf 1%-1,3% lin. beobachten. Er prägte deshalb den Begriff "hygroskopische" Expansion und versteht darunter eine erhöhte Abbindeexpansion die man erhält, wenn Feuchtigkeit in Kontakt mit abbindender Einbettmasse kommt.
LYON (63) und RYGE (90) zeigten, daß der normale und der hygroskopische Abbindeprozeß im wesentlichen derselbe sind.
Nach ASGARZADEH (1) können wir die Vielzahl der Techniken die entwickelt wurden, um die Abbindeexpansion unter hygroskopischen Bedingungen möglichst gut und steuerbar zu nutzen, in 3 Techniken unterteilen:

1. Feuchte Asbestauskleidung der Muffel
2. Immersionstechnik
3. Technik der kontrollierten Wasserzugabe.

Die Größe der hygroskopischen Expansion hängt außer von bereits genannten Faktoren von der Art der angewendeten hygroskopischen Technik (ASGARZADEH (1)), vom Immersionszeitpunkt (SCHEU zit. (57) und TAEGE (108)), von der Wasserbadtemperatur und der Menge des nach dem Anrühren aufgenommenen Wassers ab (ASGARZADEH (1)). LANDGREN (57) stellte fest, daß der günstigste Immersionszeitpunkt vor Beginn der Abbindung etwa 2-12 Minuten nach dem Anrühren liegt. Außerdem beobachtete er einen Anstieg der hygroskopischen Expansion bei erhöhter Wasserbadtemperatur, wogegen EARNSHAW (17) bei Erhöhung der Badtemperatur von 21° auf 38°C meist eine etwas niedrigere hygroskopische Expansion erhielt. TAEGE (108) fand, daß die Temperatur des Wasserbades nur von geringer Bedeutung ist. Während SCHEU (92) hygroskopische Expansionswerte von 3% lin. für möglich hält, berichtet OHASI (74) von Werten zwischen 0,6%-1,3% für die hygroskopische Expansion. LANDGREN (57) gibt maximale Werte von 0,63%-1,99% lin. an, wogegen LYON (63) experimentell Werte von 0,4%-8,1% lin. erzielte.

Diese großen Schwankungen in den angegebenen Werten sind unter anderem in einer überaus leichten Behinderung der hygroskopischen Expansion durch äußere restriktive (hemmende) Kräfte zu suchen.

51' Wie neuere Untersuchungen gezeigt haben, führen bereits ganz geringfügige Kräfte, wie die Reibung der Einbettmasse auf der Unterlage, zu einer erheblichen Beeinflussung der maximal möglichen Abbindeexpansion. KUSNER (56) beobachtete die geringsten Abbindeexpansionswerte bei Auskleidung des Meßtroges mit Zinnfolie, um zirka 20% höhere Werte bei Teflonauskleidung

und geringfügig höhere Werte bei Messung im Quecksilberbad. Unter hygroskopischen Bedingungen ergaben sich zwischen den genannten Materialien noch höhere und gleichmäßigere Unterschiede in der Abbindeexpansion. SHELL (98) konnte ebenfalls den Einfluß restriktiver Krafteinwirkung auf die hygroskopische Expansion beobachten. Dabei zeigte sich, daß bereits geringe Kräfte eine deutliche Wirkung haben, daß aber eine Kraft von einer Atmosphäre erforderlich ist, um die hygroskopische Expansion auf den Betrag der normalen Abbindeexpansion herunterzudrücken. Nach EARNSHAW (17) ist die Kraft, die benötigt wird, um die hygroskopische Expansion zu reduzieren, bei 5 untersuchten Massen nicht gleich, sondern schwankt von 150-750 gr/cm^2. Dabei erweist sich die normale Abbindeexpansion als erheblich weniger empfindlich gegen äußere Krafteinwirkungen, als die hygroskopische Expansion.

511' Während HAN (36), SCHUBERT (96), WEISS (115), GERLACH (31) und FLAUMENHAFT (22) hauptsächlich eine Deformation der Gußform durch eine starre Muffelwand befürchteten, gibt DREYER-JØRGENSEN (13) zu bedenken, daß auch bei Asbestauskleidung der Muffel sich die Abbindeexpansion nur in longitudinaler Richtung zur Muffelachse unbehindert auswirken kann und daß eine Behinderung in transversaler Richtung vorliegt. HÖNIG (43) setzt die Art der Muffelauskleidung in direkte Relation zur Größe der hygroskopischen oder Abbindeexpansion. Nach den Untersuchungen von KUSNER (56), SHELL (98) und EARNSHAW (17) müssen wir mit solch einer Behinderung rechnen, können jedoch deren Ausmaß durch Verzicht auf hygroskopische Techniken vermindern. Die Abbindeexpansion kann sowohl von außen durch den Muffelwerkstoff als auch von innen durch den Widerstand, den das Wachsmodell einer Verformung entgegensetzt, behindert werden.

512' Dabei kann nach DREYER-JØRGENSEN (14) der Dehnungswiderstand des Wachses die Expansion der Einbettmasse wesentlich beeinflussen. Als Bestätigung von JØRGENSENS Theorie kann man die Untersuchungen von MAHLER (67) und SMYD (103) werten, die eine Zunahme der Expansion bei Verwendung weicherer Wachssorten fanden. Bei Kunststoffmodellen können wir niemals mit einer gleichmäßigen Expansion, bestenfalls mit einer Deformation rechnen, da der Dehnungswiderstand der angewandten Kunststoffe sehr hoch ist. VOGEL (112) hat nachgewiesen, daß bei MOD-Inlays und Vollgußkronen immer mit einer Spaltbildung am zervikalen Rand gerechnet werden muß, falls Kunststoff als Modellmaterial zur Anwendung kommt.

513' Eine zusätzliche Beeinträchtigung der Abbindeexpansion kann durch den Auflagedruck einer Meßuhr erfolgen. DREYER-JØRGENSEN (14) stellte an mit Einbettmasse gefüllten Papierzylindern fest, daß bei einem Auflagedruck von 100gr nur halb so hohe Werte wie bei einem Auflagedruck von 0,3gr erreicht werden.
SKINNER zit. (23) beobachtete erhebliche Unterschiede bei den gemessenen Expansionswerten, die ebenfalls vom Auflagedruck der Meßuhr abhängig waren. Bei Messung mit einer optischen Apperatur wurden die höchsten Werte erzielt.

52' Neben den Faktoren, welche die Abbindeexpansion direkt beeinflussen, sind methodisch bedingte Faktoren zu nennen, welche ebenfalls Einfluß auf die Größe der gemessenen Werte haben.

521' REHBERG (82) und HÖNIG (43) konnten zeigen, daß die Expansionswerte in der Muffelachse und quer zur Muffelachse unterschiedlich sind. Diese Ergebnisse decken sich mit den Befürchtungen DREYER-JØRGENSENS (13) und müssen auf die Anwesenheit der Muffel zurückgeführt wer-

den.

522' Durch MUMFORD (68) erfahren die Untersuchungen von REHBERG und HÖNIG eine zusätzliche Erweiterung. An Hand von MOD-Modellen konnte nachgewiesen werden, daß sowohl in den verschiedenen Höhen der Muffel als auch transversal in verschiedenen Abständen zum Muffelzentrum, mit unterschiedlichen Abbindeexpansionswerten zu rechnen ist.

523' Welche Bedeutung die Form des Probenkörpers für die Größe der Abbindeexpansion hat, konnte von WAGNER (113) gezeigt werden, wobei die Abbindeexpansion mit der Meßlänge des zylindrischen Probenkörpers ab- und mit dem Durchmesser desselben zunahm.

2137 Tabellarische Übersicht der Abbindeexpansionswerte aus der Literatur für Kerr Cristobalite Inlay Investment, für E 316 und Aurovest in %lin.

Werte für die "hygroskopische Expansion" wurden nicht berücksichtigt.

Tab.1

Kerr Cristobalite Inlay Investment W:P=2:5		E 316 W:P=33:100		Aurovest W:P = 1:5	
Autor	Abb.Exp.	Autor	Abb.Exp.	Autor	Abb.Exp.
Vachuda (1933)	0,36	Klumpp (1959)	0,35	Hersteller (1967)	0,26
Schubert (1937)	0,35-0,4o	Hönig (1968)		maximaler Wert nach 3 Stunden	
Appel (1938)	0,19	nach Angaben der Hersteller			
Dreyer-Jørgensen (1953)	0,48				
Dolder (1955)	0,35				
Overdiek (1962)	0,36				

Earnshaw	0,40-
(1969)	0,60
Hersteller	0,20-
(1957-1969)	0,31

Sowohl bei gipsgebundenen wie auch bei phosphatgebundenen Einbettmassen müssen wir nach SHELL (98) mit erhöhter Abbindeexpansion unter hygroskopischen Bedingungen rechnen.

2138 Auswirkungen der Abbindeexpansion auf das Wachsmodell:

Bei der Untersuchung der Frage, welche Auswirkungen die Abbindeexpansion auf das Wachsmodell hat, müssen wir uns einerseits mit dem Problem der Wachsmodellverzerrung, andererseits mit der Bedeutung der experimentell ermittelten Abbindeexpansionswerte für die Gußtechnik auseinandersetzen. SKINNER zit. (13) prägte den Begriff "effektive" Expansion und versteht darunter die rund um das Wachsmodell auftretende Expansion.

HAN (36), WEISS (115) und FLAUMENHAFT (22) gehören mit zu den ersten Autoren, die eine Verformung des Wachsmodelles bzw. der Gußhohlform durch die abbindende Einbettmasse befürchteten. Sie sehen die eigentliche Ursache in einer Umkehrung der peripher gerichteten Abbindeexpansion durch die starre Muffelwand und empfehlen deshalb die Verwendung einer Papiermuffel (HAN) einer mit Crêpepaier ausgekleideten Muffel (WEISS) oder die in Amerika bereits damals übliche Asbestauskleidung der Muffel (FLAUMENHAFT). SPANNER (105) hält es für sinnvoller, die unbehinderte Ausdehnung der Einbettmasse beim Abbinden durch die "zweizeitige Einbettung" sicherzustellen. KROSTA (54) lehnt schon 1936 die Kaltexpansion völlig ab, da hierbei die Gefahr der Verformung des Wachsmodelles besteht. Seiner Meinung nach kann sich die Abbindeexpansion nur dann frei auswirken, wenn das Wachsmodell selber der Ausdehnung keinen Widerstand entgegensetzt.

Der Idealfall ist bei einer Kugel gegeben, bei der die nach allen Richtungen wirkende Expansion ein unbehindertes Wachstum ermöglicht. Bei komplizierten Formen kommt es nicht selten vor, daß das Modell selber der freien Ausdehnung hinderlich ist und diese entweder hemmt, oder aber eine Verzerrung durch die Expansionskräfte erleidet. Wie weitreichend die Aussagen KROSTAS sind, zeigen die Ergebnisse der folgenden Autoren:
SMYD (103) glaubt, daß es bei MOD-Inlays durch Ausdehnung des Kernes zu einer Aufbiegung der Schenkel und eventuell zu konkaver Verbiegung des okklusalen Anteils kommt. Er benutzte deshalb bei seinen Gußversuchen unter anderem ein weiches Wachs und erzielte damit gute Erfolge bei MOD-Inlays und bei Mantelkronen.
DREYER-JØRGENSEN (13) hält es durchaus für möglich, daß das Wachs durch die Expansion der Einbettmasse verformt wird; er sieht seine Vermutungen durch Versuche mit MOD-Inlaymustern bestätigt. Weiterhin konnte er nachweisen, daß die effektive Expansion bei Durotherm in verschiedenen Richtungen verschieden, aber stets wesentlich geringer war, als der für Durotherm angegebene Wert.
Die Untersuchungen von MUMFORD (68) haben die Vermutungen SMYDS voll bestätigt und zeigen, daß es sowohl zu einer Durchbiegung des okklusalen Anteils als auch zu einem Aufbiegen der Schenkel bei MOD-Inlays kommt. Die Verformungen der MOD-Wachsmodelle waren bei Verwendung einer experimentellen Einbettmasse am geringsten. Abschließend stellten die Autoren fest, daß die Einbettmasse innerhalb desselben Körpers ungleiche Dimensionsänderungen zeigt, was eine fortwährende Ursache von Verformungen ist.
DREYER-JØRGENSEN (14) stellt den Zusammenhang zwischen dem Expansionsdruck der Einbettmasse und dem Dehnungswiderstand des Wachses dar. Der Widerstand des Wachses, den dieses ei-

ner Verformung durch die abbindende Einbettmasse entgegenstellt, ist somit auch durch die Dicke des Wachses und seinen temperaturabhängigen Dehnungswiderstand bedingt. Messungen ergaben, daß der Expansionsdruck der Massen und der Dehnungswiderstand des Wachses etwa dieselbe Größenordnung besitzen und daß es bei normaler Einbettung zu einer Aufbiegung eines MOD-Inlays im zervikalen Bereich kommt. Um eine gleichmäßige Dehnung der Schenkel zu erreichen, empfiehlt DREYER-JØRGENSEN, 17 Minuten nach dem Anrühren, wenn der Expansionsdruck ein bestimmtes Ausmaß erreicht hat, die Muffel in 45° - 60° warmes Wasser zu legen, um den Dehnungswiderstand zu reduzieren und eine Aufbiegung der Schenkel zu verhindern. Bei diesem Verfahren muß aber mit geringer hygroskopischer Expansion (später Immersionszeitpunkt LANDGREN (56)) und entsprechender Wachsexpansion gerechnet werden. FUSAYAMA (25) weist dagegen darauf hin, daß die Abbindeexpansion der gebräuchlichen Einbettmassen zu groß ist, und daß durch hygroskopischen Effekt zusätzliche Verziehungen der Gußstücke hervorgerufen werden. Er fordert deshalb Massen mit einer Expansion von 0,05 % lin. und einen trockenen eingefetteten Asbestring von 2 mm Dicke.

KRÄUTLE (53) beobachtete wie MUMFORD und JØRGENSEN eine deformierte Expansion der MOD-Wachsmodelle als erwiesen; er hat aber gefunden, daß entgegen DREYER-JORGENSEN (13) die Dicke der okklusalen Schenkel bei der Vakuumeinbettung ohne Bedeutung ist.

MAHLER (67) gelangt bei Anwendung der Immersionstechnik an MOD-Inlays zu dem Schluß, daß die dabei auftretende wirksame Abbindeexpansion nicht das Ergebnis der hygroskopischen Expansion ist, sondern eher das Ergebnis der thermischen Expansion und des Weichwerdens der Wachsform. Bei Verwendung eines weicheren Wachses nimmt die Abbindeexpansion zu. Die mesiodistale Expansion war bei den

durchgeführten Untersuchungen im parapulpären Bereich größer als die mesiodistale Expansion im Bereich des Zahnfleischsaumes, was auf eine innere Verwindung der Modellform hinausläuft. Bei weicheren Wachsen und hygroskopischen Bedingungen war dieser Effekt stärker betont. Nach HÖNIG (43) steht fest, daß hygroskopisch eingebettete Wachsformen eine ungleich höhere Distorsion erleiden als dies unter nicht hygroskopischen Bedingungen der Fall ist. Die experimentell ermittelten Kaltexpansionswerte stellen lediglich eine relative Größe dar. Auf Grund der Versuchsergebnisse befürwortet er Einbettmassen mit niedriger Kaltexpansion und erhöhter thermischer Expansion.
Einen sehr interessanten Hinweis zum Problem der Wachsmodellverformungen liefert EARNSHAW (17), der Untersuchungen über den Einfluß von Kräften, die die Abbindeexpansion hemmen, durchgeführt hat. Dabei ergab sich, daß in Abwesenheit physikalischer Beeinflussung einige gipsgebundene Einbettmassen zu sehr hoher hygroskopischer Expansion fähig sind. Durch relativ geringe Kräfte kann die Expansion jedoch stark verringert werden.
Da im zahnärztlichen Gußverfahren immer eine Beeinträchtigung der Abbindeexpansion gegeben ist, kann es zur Verziehung der Gußmulde kommen. Sie ist bei den Massen die die höchste hygroskopische Expansion aufweisen, am stärksten.

SKINNER zit. (13) und HEHRING (39) streiten der Einbettmasse grundsätzlich die Fähigkeit ab, ein Wachsmodell zu expandieren. Sie glauben, daß die effektive Expansion des Wachsmodelles Ausdruck der thermischen Expansion des Wachses ist, die aus der Abbindewärme der Einbettmasse resultiert. Dabei benötigt man, um eine Expansion des Wachsmodelles von 0,3%-0,4% lin. zu erreichen, mindestens 40%-45% Gips.
DREYER-JØRGENSEN (13) hat die Darstellungen SKINNERS widerlegt und stützt sich dabei auf die Tatsache, daß

Cristobalite in der Muffel nur eine Wärme von 1° C entwickelt und daß dicke Kronen häufiger zu klein werden als dünne, was gegen eine thermische Expansion aber für eine behinderte Abbindeexpansion der Einbettmasse spricht. MAHLER (67)hält wiederum die hygroskopische Expansion bei Warmwasserbadeinbettung für das Ergebnis der thermischen Expansion, wobei auch das Weichwerden der Wachsform von Bedeutung ist.

Die Verformungen des Wachsmodelles die beim Abbinden der Einbettmassen auftreten, lassen keinen Rückschluß darauf zu, ob es sich dabei um die Wirkung der thermischen Expansion des Wachses oder der Abbindeexpansion der Einbettmassen handelt, da auch Spannungen im Gußwachs zu einer Verformung führen können. In der Praxis müssen wir sowohl mit einer masseabhängigen thermischen Expansion des Wachses (DREYER-JØRGENSEN (13)) und mit der Auswirkung der Abbindeexpansion rechnen. Die beim Abbinden auftretende Wärme hängt von der Menge und der Art der angerührten Masse ab. An Hand der Literatur konnte gezeigt werden, daß grundsätzlich immer mit einer Verformung des Wachsmodelles gerechnet werden muß, da selbst ein einheitlicher Einbettmassekörper ungleichmäßig expandiert (MUMFORD (68)). Das Ausmaß der Verformung hängt von der Form des Wachsmodelles und vom Abbindeexpansionskoeffizienten der Einbettmasse ab, der jedoch nur relativen Aussagewert hat (DREYER-JØRGENSEN (13)).

Weiterhin wird das Ausmaß der Verformung vom Dehnungswiderstand des Wachses beeinflußt.

Während DREYER-JØRGENSEN (14) bei verringertem Dehnungswiderstand des Wachses bessere Ergebnisse erzielte, erhielt MAHLER (67) mit weichem Wachs schlechtere Resultate. Zur Lösung des Problems, das die Verformung der Wachsmodelle für die zahnärztliche Gußtechnik darstellt, schla-

gen FUSAYAMA (25) und HÖNIG (43) Massen mit niedriger Abbindeexpansion vor. SMYD (103) verwendet ein weicheres Wachs und DREYER-JØRGENSEN (14) glaubt durch ein Warmwasserbad den Dehnungswiderstand des Wachses verringern zu können und somit die Verformung auf ein erträgliches Maß zu reduzieren.

2139 Bisher geübte Meßverfahren zur Bestimmung der Abbindeexpansion:

Bevor wir uns an eine kritische Beurteilung der in der Zahnheilkunde veröffentlichten Meßverfahren machen, müssen wir uns über den Zweck der einzelnen Untersuchungen und über die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren klar werden.

SOLBRIG (104) hat bereits den Versuch unternommen, die Abbindeexpansion unter variablen Bedingungen metrisch zu erfassen. Er bediente sich dabei eines Zylinders, der oben lose mit einem Deckel verschlossen war und der mit einem Hebel in Verbindung stand. Die Bewegungen des langen Hebelendes konnten dabei an einer Skala abgelesen werden.

HAN (36) variierte den Solbrigschen Apparat, indem er die Scheibe direkt auf die Masse legte und indem er den Hebel äquilibrierte, um den Druck auf die Einbettmasse zu vermindern.

LANDGREN (57) legte ein Deckglas auf die Oberfläche der in einer Gußmuffel mit Asbestauskleidung befindlichen Masse; die Messung erfolgte mit einer Mikromeßuhr, deren Meßdruck mit einem Gewicht ausbalanciert wurde.

DREYER-JØRGENSEN (14) untersuchte mit einer $\pm$1µ genauen Meßuhr, die einen Meßdruck von einmal 100gr und einmal 0,3gr hatte, unter Verwendung einer Papiermuffel die Abbindeexpansion und erhielt bei verringertem Meßdruck doppelt so große Werte. WAGNER (113) benutzte ein nur 0,12gr

schweres Deckglas und anstelle einer Meßuhr einen Mikrokator mit 2gr Meßdruck. EARNSHAW (17) und HÖNIG (43) beobachteten die Bewegungen einer Nadel, die auf einem Deckglas befestigt war und die die Veränderungen an einem zylindrischen Probekörper aufzeigte. Während die Methode Solbrigs, die die Expansionsveränderungen an der Oberfläche einer zylindrischen Probe aufzeigen sollte, durch das Hebelgewicht, durch die Massenträgheit und die dabei auftretende Reibung noch sehr ungenau war, so stellt die von EARNSHAW und HÖNIG veröffentlichte Meßvorrichtung ein sehr empfindliches Instrument zur Bestimmung der Abbindeexpansion in axialer Richtung dar. Mit den erwähnten Methoden lassen sich nicht zuletzt wegen der Einfachheit der Versuchsanordnungen gut variable Bedingungen, wie sie der Meßdruck, der Muffelwerkstoff, Verarbeitung der Einbettmassen und die unterschiedlichen Einbettmassen selbst darstellen, untersuchen. Die Aussagegenauigkeit nimmt selbstverständlich mit der Empfindlichkeit des Meßsystems zu. Trotzdem gilt es zu bedenken, daß hierbei nur Veränderungen in Richtung der Muffelachse, an der Oberfläche der Proben dargestellt werden können und daß die dabei erzielten relativen Werte mit jeder geringfügigen Änderung der Versuchsbedingungen voneinander abweichen. SCHUBERT (95) suchte im Anschluß an HAN (36) die Abbindeexpansion in horizontaler Richtung zu messen. Er bediente sich dabei eines mit Ceresinpapier belegten Mikroskoptisches. Auf diesen schüttete er Einbettmassebrei und untersuchte mit einem Meßmikroskop die Bewegung zweier Kupferbleche, die sich auf der Oberfläche des Breies befanden. SCHEU zit. (57) benutzte zur Messung der Abbindeexpansion eine rechteckige Hohlform, die aus Präzisionsmeßblöcken auf einer Glasplatte bestand.

In der ADA-Spezifikation Nr.2 wird eine Methode ähnlich der von SCHUBERT empfohlen, die OHASI (74) neuerdings benutzte, um handelsübliche Einbettmassen untereinander zu

vergleichen, und die auf COLEMAN zit. (57) zurückgeht. Dabei wird die Abstandsänderung zweier 30cm voneinander entfernter Markierungen mit einem Komparator Mikrometermikroskop untersucht. Die Probe mit den Markierungen befindet sich dabei in einem V-förmigen, mit Kofferdam ausgekleideten Trog. KUSNER (56) führte seine Untersuchungen in einem horizontalen Trog bei Zinnfolien- oder Teflonauskleidung durch. Er benutzte auch Quecksilber auf dem die Masse möglichst reibungslos ihr Volumen verändern konnte. Dabei wurden alle Volumenveränderungen von einer Nadel, die auf einer von Einbettmasse umgebenen Akrylatbasis befestigt war, angezeigt. Mit den zuletzt genannten Meßmethoden wie sie SCHUBERT, SCHEU und OHASI angeben, können wir lediglich die Abbindeexpansion in horizontaler Richtung erfassen.
Die Methode von KUSNER eignet sich hervorragend zur Analyse des frühen Expansionsgeschehens, da die Masse bei ihrer Ausdehnung nur geringen Widerstand überwinden muß.
ASGARZADEH (1) gibt eine sehr aufwendige Methode an, um die Dimensionsveränderungen in axialer und transversaler Richtung zu messen.In axialer Richtung zeigte dabei ein Kathetometer die Bewegung eines feinen Drahtes an der Oberfläche an, während die seitliche Expansion durch Photographieren von 4 diametral angeordneten Meßmarken an einer viergeteilten Muffel festgehalten wurde. Die Aufnahmen wurden dann unter dem Komparatormikroskop ausgewertet. Alle bisher erwähnten Meßmethoden ergeben je nach der Empfindlichkeit der Meßvorrichtung gute Expansions-Zeitkurven; der Expansionsverlauf läßt sich hiermit unter den verschiedensten variablen Bedingungen aufzeichnen. Eine Methode, die FLAUMENHAFT (23) angibt, sagt weder über den Expansionsverlauf noch über die effektive Expansion etwas aus. Dabei wurde um einen konischen Stab auf einem Anschlagring eine Papiermanschette befestigt und der Hohlraum mit Ein-

bettmasse ausgefüllt. Die Spaltbildung zwischen Stab und Ring sollte dabei über die Abbindeexpansion Auskunft geben.

Eine Methode die Auskunft über die "effektive" Expansion von MOD-Inlays gibt und die in keiner Weise den Abbindevorgang beeinträchtigt, wurde vom MUMFORD (68) beschrieben. Er verwendete dazu ein Stahlmodell, welches die Herstellung eines stilisierten MOD-Inlays ermöglichte, das an den gingivalen und okklusalen Oberflächen scharfe Meßlinien aufwies. Nach dem Abbinden der Einbettmasse wurde die okklusale Oberfläche der Wachsform sorgfältig freigelegt und das Ganze in der Mitte zwischen okklusaler und gingivaler Ebene nochmals geteilt. Nach dem Entfernen des Wachses mit warmem Tetrachlorkohlenstoff wurden die Markierungen mit einem Gärtner-Komparator-Mikroskop vermessen. Mit dieser Methode war es unter Variation der Schnittlinie und des Wachsmodelles möglich, die Expansion in axialer als auch in transversaler Richtung zu messen.

MAHLER (67) weist auf ein bereits 1962 veröffentlichtes Meßverfahren hin, das sich ebenfalls zur Messung der effektiven Expansion eignet und wobei ebenfalls das Negativ der Wachsform in der Einbettmasse vermessen wurde. KRÄUTLE (53) benutzt ein ähnliches Verfahren, wobei er aber das Wachsmodell nicht entfernt, sondern mit einem scharfen Messer im Sinne eines Mikrotoms die Meßmarken im MOD-Wachsmodell freilegt.

Sämtliche Verfahren zur Messung der "effektiven" Expansion stellen die bis zum Meßzeitpunkt erfolgten Veränderungen am Wachsmodell fest. Sie geben jedoch keinerlei Auskunft über den zeitlichen Verlauf der am Wachsmodell erfolgten Veränderungen. Keines der bisher bekannten, mit Ausnahme des von REITHER (85) veröffentlichten Verfahrens, das später noch ausführlich besprochen wird, ermöglicht Aussagen über die "effektive" Expansion an Vollgußkronen und kann auf eine Vielzahl von Markierungen verzichten.

214 Muffelwerkstoff:

Die Frage des Muffelwerkstoffes wurde bereits kurz im Zusammenhang mit der Behinderung der Abbindeexpansion besprochen. Nach den Untersuchungen von KUSNER (56) müssen wir bei jeglicher Umkleidung der Einbettmassen mit einer geringfügigen Behinderung der Abbindeexpansion rechnen. Das Ausmaß der Behinderung hängt jedoch sehr stark vom verwendeten Muffelwerkstoff ab.
Grundsätzlich soll der Muffelwerkstoff die volle Abbinde- und thermische Expansion der Einbettmassen ermöglichen. HAN (36) empfiehlt deshalb die Verwendung von Papierzylindern, nachdem er die Expansion der Einbettmasse und die Vergrößerung der Gußhohlform bei Pergamentpapiermuffeleinbettung bewiesen hat.
Nach den Ausführungen von WEISS (115) halten Taylor und Pfaffenberger die Abbindeexpansion der Einbettmassen für so geringfügig, daß sie vernachlässigt werden kann. Sie haben jedoch erkannt, daß die thermische Ausdehnung der Cristobalite-haltigen Massen wesentlich größer ist, als die des Messingringes und halten eine Asbestzwischenlage für notwendig. WEISS benutzte anstelle von Asbest aus Angst vor technischen Schwierigkeiten zwei bis drei Lagen Crêpepapier. FABIAN zit. (115) schlägt die gefensterte Muffel vor, da er die Papierauskleidung, die seiner Meinung nach einen zu raschen Wasserentzug herbeiführt, vermeiden und auf einen festen Gußring nicht verzichten möchte.
SCHUBERT (95) geht sogar noch weiter; er befürchtet, daß selbst Pergamentpapier die Abbindedehnung der Einbettmasse behindern könnte. Er propagiert deshalb eine muffelfreie Einbettung mit Kern. Nach voller Aushärtung des Kernes wird in üblicher Weise eingebettet. SCHUBERT bewertet allerdings die Abbindedehnung zu sehr und vernachlässigt die thermische Dehnung.

ROSENZWEIG (88) berichtet wiederum von einer Methode, die das Buro of Standards empfohlen hat und bei der der Gußring mit einem dünnen Asbestblatt ausgekleidet wird.
GERLACH (32) äußert seine Bedenken hinsichtlich der muffenlosen Einbettung, wie sie die Papiermuffel nach HAN darstellt, da beim Gießen mit der Schleuder ein beträchtliches Temperaturgefälle auftritt und andererseits die Benutzung eines Druckgußapparates die Muffel sprengen würde. Er hält eine zweigeteilte Muffel, die sich zwar verriegeln läßt, aber dennoch eine Volumenbewegung der Masse mitmachen kann für zweckmäßiger. Hinsichtlich der gleichmäßigen Expansionsfähigkeit der Einbettmasse in einer zweigeteilten Muffel müssen GERLACH jedoch Bedenken gekommen sein, da er wenig später die Kerneinbettung unter Verwendung einer besonders geformten Muffel mit Asbestauskleidung empfiehlt. Bei dieser Methode hat GERLACH die Anregungen SCHUBERTS (95) und die des Buro of Standards realisiert.
OETTINGER (72) hat die Gedanken GERLACHS weiterverfolgt und hält das Bestreichen der Innenwände des Gußringes mit technischer Vaseline für sinnvoller. Damit soll eine unbehinderte Abbinde- und thermische Expansion erreicht werden und zudem springt die Einbettmasse beim Erhitzen weniger leicht.
Selbst GERLACH (33) gibt der Methode von OETTINGER den Vorzug, da bei zu starker Durchfeuchtung der Asbestpappe die Einbettmasse am Rande schlechter abbindet und weniger hart wird. Als weiterer Versuch von der starren Muffelwand abzukommen, kann die Gummimuffeleinbettung nach FLAUMENHAFT (22) und LEDNICER zit. (23) angesehen werden.
DREYER-JØRGENSEN (13) meldet hinsichtlich einer Asbestauskleidung der Gußringe Bedenken an, denn er glaubt,daß sie von vornherein keine hohe Präzision erwarten läßt, da die Expansion im Gußring trotz Asbestauskleidung sehr ungleichmäßig ist. Als Gründe führt er die zu feste Anla-

gerung des Asbestes an die Muffelwand mit daraus resultierender Pseudokontraktion und die unvollkommene Bedekkung der gesamten Muffelwand an. Werden nur 3 mm von der gesamten Ringwand freigelassen, so ist die Expansion genauso groß wie ohne Asbestauskleidung.

Veröffentlichungen der Fa. DEGUSSA (10) und von SHELL (99) nehmen ebenfalls zur Frage der Asbestauskleidung in voller Länge der Muffelwand Stellung und kommen wie DREYER-JØRGENSEN zu der Erkenntnis, daß die Abbinde- und nach SHELL (99) auch die Totalexpansion bei Verwendung einer zu kurzen Asbestauskleidung geringer ist. Als Alternativlösung zur Asbestauskleidung empfiehlt DREYER-JØRGENSEN (13) die Papiermuffeleinbettung, wobei er die Abkühlung der Muffel beim Guß für unwesentlich erklärt. FUSAYAMA (25) und HÖNIG (43) konnten nachweisen, daß es unter hygroskopischen Bedingungen immer zu erhöhter Distorsion der Wachsmodelle kommt und daß die Anwendung eines feuchten Asbeststreifens als hygroskopische Technik, wie sie SCHEU (92) beschrieben hat, anzusehen ist.

FUSAYAMA (25) versucht den hygroskopischen Effekt durch Einfetten des 2 mm starken trockenen Asbestes mit Cakaobutter zu verhindern.

Auch SHELL (100) nimmt zur Frage "trockene oder feuchte Asbestauskleidung" Stellung und fand, daß bei trockener Asbestauskleidung die Abbindeexpansion geringfügig erniedrigt und die thermische Expansion leicht erhöht ist, wodurch die Totalexpansion unverändert bleibt. Inwiefern dieser Effekt durch die Saugwirkung des trockenen Asbestes hervorgerufen wird, läßt sich an Hand der Veröffentlichung nicht klären.

Übereinstimmend halten OEHRLEIN (70), KLUMPP (49), ZÄHRINGER (118), FINKBEINER (21), DEGUSSA (10) und SHELL (99) die Asbestauskleidung der Gußmuffel für sinnvoll, wobei nach OEHRLEIN (70) und ZÄHRINGER (118) eine Mindest-

dicke von 1 mm Asbest ausreichend ist.
Die Bedenken, die DREYER-JØRGENSEN (13) gegen die Asbestauskleidung der Muffel hat, müssen kritisch beurteilt werden, da beim Ausfetten der trockenen Asbesteinlage nach FUSAYAMA (25) eine Pseudokontraktion der Ringwand nicht auftreten kann und eine vollständige Auskleidung der gesamten Muffelwand technisch möglich ist. Außerdem stellt die Verwendung einer Papiermuffel und zusätzliche Immersion eine hygroskopische Technik dar, die zu einer Verformung des Wachsmodelles führen muß.
Auch die gefensterte Muffel nach FABIAN muß abgelehnt werden, da schon eine unvollständige Auskleidung der Muffel mit Asbest die Abbindeexpansion der Einbettmasse behindert.

215 Einbettungsverfahren:

Mit Vervollkommnung der Gußtechnik wurden eine große Anzahl von Einbettungsverfahren entwickelt, die dazu dienen, die Form des Wachsmodelles möglichst exakt in einer feuerfesten Masse, der Gußeinbettungsmasse, zu sichern. Dabei liegen die Schwerpunkte je nach der zur Anwendung kommenden Methode in einer möglichst unbehinderten Entfaltung der Abbindeexpansion (zweizeitige Einbettung), in einer möglichst hohen Abbindeexpansion (hygroskopische Techniken) oder in möglichst gut reproduzierbaren (gleichmäßigen) Ergebnissen und glatter Oberfläche der Gußobjekte (Vakuumeinbettung).
In Anlehnung an ZÄHRINGER (118) können wir die in der Literatur beschriebenen Verfahren in drei Gruppen unterteilen.

1) Hygroskopische Techniken (nach ASGARZADEH (1)):
   - Immersionstechnik
   - Kontrollierte Wasserzugabe
   - Feuchte Asbestauskleidung der Muffel
2) Methoden zur Verdichtung der Massen:
   - Zweizeitige Einbettung (Kerneinbettung)
   - Einbettung mittels Zentrifuge

Einbettung mittels Vakuum
Einbettung mittels Überdruck

3) Methoden die die Wärmeexpansion des Wachses ausnutzen

Ohne detailliert auf die Methoden der Wachsexpansionstechnik einzugehen, können wir sagen, daß die Warm-Wasserbad-Einbettung nach MEYER MAVES, die Papiermuffeleinbettung nach HAN und die Kerr Expansionstechnik, wie SCHUBERT sie beschreibt (96), abgelehnt werden müssen.
Einerseits ist die Kerr-Expansionstechnik, die von den drei genannten Verfahren nach SCHUBERT die besten Gußresultate zeigte, sehr umständlich, andererseits bezweifeln WEISS (115) und GERLACH (29) grundsätzlich eine mögliche Wachsexpansion.
WEISS (115) sieht die Ursache dafür im starren unnachgiebigen Muffelring, während GERLACH glaubt, daß die Abbindezeit von 2-3 Minuten nicht ausreicht, um eine genügende Wachsexpansion zu ermöglichen. Auch die Methode der Crêpepapierauskleidung nach WEISS (115) wirft neue Probleme auf, da sie letztlich eine hygroskopische Technik darstellt.
ROSENZWEIG (88) gibt anläßlich einer Untersuchung des amerikanischen Buro of Standards zu bedenken, daß eine Methode, die so unregelmäßige Resultate zeitigt wie die Wachsexpansionstechnik, nicht als Standardmethode empfohlen werden kann.
Weiterhin muß, um eine Expansion des Wachsmodelles zu erreichen, dasselbe über die Verarbeitungstemperatur erwärmt werden (NELKE (69)). Bei einer Erwärmung über die Arbeitstemperatur hinaus ist mit dem Freiwerden innerer Spannungen zu rechnen. (PRICE zit. (104), HARNDT (38), TAEGE (108), BEECK (2), BONSACK (5), FUSAYAMA (25), PHILLIPS und BIGGS (77), MAVES (64)).
Bei der von SCHEU (92) und DREYER-JØRGENSEN (13,14) beschriebenen Immersionstechnik handelt es sich um eine hygroskopische Technik. Dabei soll nach SCHEU (92) durch

die Badtemperatur ein Weichwerden des Wachses und damit eine ungestörte erhöhte Abbindeexpansion möglich werden. DREYER-JØRGENSEN versuchte mit dem Warmwasserbad, in das die mit Einbettmasse gefüllte Papiermuffel eingelegt wurde, vor allem den Dehnungswiderstand des Wachses zu einem Zeitpunkt zu reduzieren, zu dem die Einbettmasse seiner Meinung nach genügend fest war, um eine Verformung der Wachsmodelle zu verhindern und andererseits noch hygroskopisch expandierte. Außerdem muß die Immersionstechnik als eine Methode der Wachsexpansion betrachtet werden, die zwangsläufig zur Verformung des Wachsmodelles führt. HEHRING (39) sieht die hygroskopische Expansion sogar ausschließlich als Ergebnis der Wachsexpansion an. Auch MAHLER (67) glaubt, daß die erhöhte Expansion bei der Immersionstechnik eher in der thermischen Expansion des Wachses und in der Wachserweichung zu suchen ist.
Zusätzlich gibt BEECK (2) anläßlich einer Arbeit von Anske zu bedenken, daß sowohl bei der kontrollierten Wasserzugabe nach PEYTON als auch bei der Immersiontechnik nicht mit einer gleichmäßigen Durchdringung der noch nicht abgebundenen Einbettmasse durch nachträglich zugegebenes Wasser zu rechnen ist. Folglich kann die Einbettmasse unter hygroskopischen Bedingungen auch nicht gleichmäßig expandieren. Übereinstimmend berichten HEHRING (39), SUFFERT (106), GERCKEN (28), LINDERMANN (61), FUSAYAMA (25), HÖNIG (43) von schlechten Ergebnissen mit hygroskopischen Einbettverfahren im Vergleich zu anderen Techniken. OHASI (74) konnte sogar nachweisen, daß die Abbindeexpansion der von ihm nach der ADA-Spezifikation Nr.2 untersuchten Massen bei hygroskopischen Bedingungen unter oder nur knapp über dem spezifizierten Minimum lag.
Als Ursachen für die unbefriedigenden Gußergebnisse werden erhöhte Distorsion (FUSAYAMA (25), HÖFER (42)), zu geringe Gesamtexpansion (HEHRING (39), GERCKEN (28), OHASI (74))und zu starke Abweichungen in den Ergebnissen (SUFFERT (106))

angeführt. HÖFER (42) und TAEGE (108) wissen dagegen von guten Gußergebnissen von Massen, die in der DDR hergestellt wurden, zu berichten, obwohl nach TAEGE (108) und HÖNIG (43) mit verringerter thermischer Expansion gerechnet werden muß.

Die hygroskopischen Einbettungsverfahren und speziell dafür entwickelte Massen haben sich bei uns nicht durchgesetzt. Als Gründe sind schwankende und unbefriedigende Gußergebnisse, die auch in der leichten Beeinflußbarkeit der hygroskopischen Expansion (KUSNER (56)) zu suchen sind, sowie die umständliche Technik zu nennen.

Mit der Veröffentlichung von BONSACK (5) wurde die Zahnärzteschaft auf eine Methode aufmerksam gemacht, die ähnlich wie die zweizeitige- oder Kerneinbettung eine Verdichtung der Einbettmassen ermöglicht, die aber zusätzlich die gleichzeitige Einbettung mehrerer Gußobjekte bei geringerem Zeitaufwand und unter maximaler Ausschaltung menschlicher Fehlerquellen gestattet (PHILLIPS (77a), BONSACK (5), HEHRING (39)).

BONSACK (5) bezeichnet das Vakuum als einen sensationellen Fortschritt in der Gußtechnik. Die Vakuum-Einbettmethode wurde nach GERCKEN (28) in den USA entwickelt, wo sie nach BONSACK (5) während des zweiten Weltkrieges zur Herstellung komplizierter Flugzeugteile mit Toleranzen von 0,07 mm diente. Nach GERCKEN (28) und OVERDIECK (76) unterscheiden wir mehrere Techniken der Vakuumeinbettung, die OVERDIECK in drei verschiedene unterteilt:

1 Entlüftete Masse wird zur Kerneinbettung verwandt
2 Evakuierung des Wachsmodelles in der mit Einbettmasse gefüllten Muffel
3 Pulver und Flüssigkeit unter Vakuum angerührt und Wachsmodell unter Vakuum eingebettet.

Bei der zuerst genannten Technik besteht die Gefahr eines erneuten Luftzumischens durch die Kerneinbettung. Zudem

handelt es sich dabei um eine modifizierte Kerneinbettung mit dem Versuch die Masse um den Kern möglichst blasenfrei zu bekommen.
Nur die Techniken 2 und 3 dürfen als echte Vakuumeinbettungsmethoden bezeichnet werden.
Im einzelnen ist nach GRASSL (34), BONSACK (5), SCHWINDLING (97) und OVERDIECK (76) ein Vakuum von 12-16 mmHg notwendig. Dabei soll die Temperatur des Anrührwassers ca. 20° betragen, damit der Siedepunkt der flüssigen Einbettmassebestandteile erreicht wird. Nach PHILLIPS (77a) und OVERDIECK (76) sichert ein etwa 10 Sekunden andauernder Siedeprozeß die völlige Entlüftung der Masse. Die hochsteigenden Wasserdampfbläschen kondensieren unter Atmosphärendruck sofort wieder. GRASSL (34) und BONSACK (5) ebenso wie OVERDIECK (76) halten die dabei auftretende Temperaturerniedrigung von 2°F für unbedeutend. Der dabei nach BONSACK auftretende Wasserverlust von 0,32g ist ebenfalls ohne Bedeutung. Nach dem Evakuieren bis zum Ausgleich der Druckverhältnisse führt langsam einströmende Luft zu einer zusätzlichen dichten Anlagerung der Masse an das Wachsmodell.
Die Vorteile der Vakuumeinbettung werden von LYON (62), BONSACK (5), GRASSL (34), HEHRING (39), SCHWINDLING (97), OESCHGER (71), TITKEMEYER (109), BEECK (2) und VERGE (111) diskutiert. Fast alle genannten Autoren bestätigen, daß die Oberflächen in einem bisher unerreichten Ausmaß von Gußperlen und Poren frei sind. GRASSL (34), HEHRING (39) und BEECK (2) haben mit der Vakuumeinbettungsmethode die geringsten Schwankungen in den Ergebnissen erzielt, was auf einen gleichmäßigen Verdichtungsgrad zurückzuführen ist. OESCHGER (71), GERCKEN (28) und VERGE (110) berichten bei Verwendung cristobalitehaltiger Massen und Vakuumeinbettung von Güssen mit hervorragender Paßform.
SCHWINDLING (97) gibt zu bedenken, daß das Anrührverhält-

nis im Sinne einer erhöhten Wasserzugabe verändert werden müßte, was nach Untersuchungen von GERLACH (30) zu verringerter thermischer Expansion führt. Ein geringer Wasserzusatz von 6-7% ist aber nach OVERDIECK (76) selbst unter Berücksichtigung der Gerlachschen Untersuchungsergebnisse tragbar. WAGNER (113) bestätigt, daß auch für die Abbindeexpansion geringe Veränderungen des Mischungsverhältnisses nur bescheidenen Einfluß haben. KIWKOWICZ (48) bemängelt bei seinen Untersuchungen über die Vakuumeinbettung das frühe Abbinden der handelsüblichen Massen sowie eine vermehrte Zahl von Gußperlen. Das Auftreten von Gußperlen läßt sich mit dem frühzeitigen Abbinden oder nach ZÄHRINGER (118) mit dem Fehlen eines Vibrators und dem Entfetten mit Alkohol erklären.
KÖNSGEN (51) erzielte mit der Vakuumeinbettung zu kleine Gußringe und empfiehlt das Schichtkernverfahren.
PRENZ (78) wiederum glaubt, daß die verminderte Abbindeexpansion, die er bei der Vakuumeinbettung festgestellt hat, im fehlenden Einfluß der Luftblasen, die durch die Abbindewärme den zähen Einbettmassebrei dehnen, zu suchen ist.
Trotz der ungünstigen Ergebnisse von KIWKOWICZ (48), KÖNSGEN (51) und PRENZ (78) können wir mit OVERDIECK (76) feststellen, daß die Vakuumeinbettungsmethode in der Literatur allgemein günstig beurteilt wird. Bei der Abwägung der Nachteile dieser Methode bleibt lediglich der im Vergleich zur Kerneinbettung hohe finanzielle Aufwand für ein Vakuumeinbettgerät zu erwähnen.
Eine Umkehrung der Vakuumeinbettung kann in der Überdruckeinbettung, wie sie ROSSMANN (89) und neuerdings BODIRSKY (3) beschrieben haben, gesehen werden. Bei der Vakuumeinbettung wird nach ZÄHRINGER (118) ein Luftbläschen bei 16-18Torr um das 45-fache vergrößert und steigt damit an die Oberfläche der Einbettmasse, während nach ROSSMANN ein Überdruck von 10 atü eine Verkleinerung eines Luft-

bläschens auf 1/10 richtigerweise auf 1/11 seines Ausgangsvolumens bewirkt. Schon aus diesem Grunde ist die Vakuumeinbettung der Überdruckeinbettung überlegen, da sie ein Entweichen der Luftblasen und nicht nur ihre Verkleinerung bewirkt. BODIRSKY (3) empfiehlt das Hydro-Kompressions-Einbettverfahren als neues Präzisionseinbettsystem das gußperlenfreie und paßgenaue Präzisionsgüsse mit glatter Oberfläche liefert; weitere Vorteile sind die Ersparnis für die teure Vakuumeinbettanlage und die Möglichkeit mehrere Muffeln auf einmal einzubetten. Zumindest die Behauptung, daß man mit diesem Verfahren gußperlenfreie Güsse erzielt, bedarf einer sehr kritischen Prüfung, da wir lediglich mit einer Verkleinerung der Bläschen, nicht aber mit deren Verschwinden rechnen können. Auf eine Besprechung der zweizeitigen oder Kerneinbettung möchten wir im Rahmen dieser Arbeit verzichten und verweisen auf die Autoren KLUMPP (49), KÖNSGEN (51), LANGER (58), ZÄHRINGER (118), FINKBEINER (21), LINDERMANN (61), GERCKEN (28) und ROHRBACH (87).

Unser besonderes Interesse gilt der Zentrifugaleinbettung, die im Rahmen der Zahnheilkunde von DANZ (9) unter Mitwirkung von THIELEMANN dann von RIGBERS (86), HANSOHM (37), BUDZINSKY (7), FINKBEINER (21) und FÜHRER (24) beschrieben wurde. Sie stellt ebenfalls eine Methode zur Einbettmassenverdichtung dar. Die Methode beruht darauf, daß die größeren und schwereren Masseteilchen (Quarz und Gips) zur Peripherie hin geschleudert werden und die leichteren Bestandteile (Wasser) sich zur Rotationsachse hin abscheiden. DANZ (9) verwendete eine Laborzentrifuge und eine Form aus Zinnfolie, in die die Einbettmasse gefüllt wurde. Bei einer Umdrehungszahl von 1200 U/min und einer Zentrifugierdauer von 2 Minuten sonderte sich an der Oberfläche der Masse etwa 3 cm hoch Wasser ab. Die Bruchfestigkeit konnte durch den Verdichtungsprozeß um 30-325 Gramm, abhängig

von der zur Verwendung kommenden Masse gesteigert werden. Außerdem wurde eine Steigerung der thermischen Expansion um 0,4% beobachtet.

HANSOHM (37) und RIGBERS (86) arbeiteten mit derselben Zentrifuge unter Verwendung von Zylindern aus Zinnblech die stecknadelgroße Perforationen aufweisen. Geschleudert wurde bei 1400 U/min. HANSOHM berichtet von kontraktionsfreien Güssen mit Durotherm und auch RIGBERS empfiehlt die Zentrifugaleinbettung zur Herstellung von fehlerfreien MOD-Füllungen und Gußkappen. HANSOHM beobachtete lediglich vermehrtes Auftreten von Blasen an der zentripedalen (Oberseite) des Modelles, wogegen RIGBERS beim freien Zentrifugieren eines einfachen Wachsmodelles Verziehungen beobachtet hat. Dabei wurde ein runder Wachsring oval. RIGBERS erwähnt außerdem, daß das Mischungsverhältnis nur von untergeordneter Rolle ist, da sich das Wasser beim Zentrifugieren ja doch abscheidet.

Die recht ermunternden Ergebnisse von DANZ, HANSOHM und RIGBERS werden durch die Untersuchungen von KÖNSGEN (51) und BUDZINSKY (7) zunichtegemacht.

KÖNSGEN benutzte einen Emda-Motor mit 1500 und 3000U/min auf dem eine Scheibe mit 20 cm Durchmesser und 1,5 cm breitem Rand montiert war. Geschleudert wurde in einer Papiermanschette, die als Muffel diente zuerst 1 Minute bei 1500 U/min und nach dem vollständigen Auffüllen 5 Minuten bei 3000 U/min. Die so gewonnenen harten Innenkerne wurden nach 45 Minuten in einer Muffel mit Fließpapierauskleidung eingebettet. Dabei ergab sich, daß alle durch Zentrifugieren eingebetteten Gußobjekte im Gegensatz zu den Schichtkern-eingebetteten und den Vakuum-eingebetteten nicht paßten.

BUDZINSKY (7) stellte mit einer Modellzentrifuge schwedischer Bauart Prüfkörpermodelle her. Dabei wurde aus einem Plastikbehälter mit stecknadelkopfgroßer Öffnung Einbettmasse in einen Kupferring eingeschleudert. Die Schleuder-

dauer betrug 30 Sekunden bei 3000 U/min und erbrachte im Vergleich zur harten Innenkerneinbettung glattere und blasenfreiere Stümpfe. Die Gußversuche zeigten aber, daß kein Ring, der mit der Zentrifugier-Einbettungsmethode hergestellt wurde, paßte. Weiterhin konnte BUDZINSKY nachweisen, daß die Dichte der zentrifugierten Einbettmassekörper geringer war, als die nach der harten Innenkern-Einbettung hergestellten. Als Ursache dafür sah er die schnelle Abbindung der Massen an.

FINKBEINER (21) benutzte eine Muffel mit Asbesteinlage, die auf dem Vibrator mit Einbettmasse gefüllt und mit Hilfe einer Siriusschleuder sofort zweimal geschleudert wurde. Das hohe Schwindmaß der fertigen MOD-Gußobjekte versuchte er durch den Wasserverlust beim Zentrifugieren zu erklären, da seiner Meinung nach durch die Verdichtung der Masse mit geringerer Abbindeexpansion zu rechnen ist. Diese Vermutung steht aber im Gegensatz zu den Untersuchungen von TAEGE (108) SCHACKE (91) SHELL (100) und anderen. Interessante Untersuchungen über den Einfluß der Zentrifugalkraft auf die Porosität, die Oberflächenrauhigkeit und den Kristallaufbau bei zentrifugierten Gipskörpern finden wir in der Dissertation von FÜHRER (24). Auch in diesem Fall wurde eine Zentrifuge schwedischer Bauart mit 3000 U/min benutzt. Dabei konnte die Porosität, die an Hand des Wasseraufnahmevermögens der Massen gemessen wurde, bei Duroc um ca. 50% gesenkt werden. Die Porositätsabnahme war bei Verwendung der Einbettmasse E316 am geringsten also massenabhängig. Weiterhin zeigte sich, daß 20 Sekunden Schleuderzeit die größte Dichte ergaben, wobei die Porosität bei längerer Schleuderzeit wieder um 3 % anstieg. Als Ursachen für die Porosität sieht FÜHRER bläschenförmige Hohlräume die überschüssiges, in der Masse befindliches Wasser nach dem Verdampfen hinterläßt und nachkristalline Durchbewegungen an. In den nachkristallinen Durchbewegungen muß auch die Zunahme der Porosität bei längerer Schleuderzeit gese-

hen werden. Bezüglich der Oberflächengenauigkeit ging FÜHRER von der Annahme aus, daß durch Einschleudern eine Umlagerung des Gefüges quer zur Schleuderrichtung stattfindet, daß die größten Kristalle am schnellsten sedimentieren und sich in ihren glatten ebenen Längsflächen parallel zur Oberfläche einstellen und somit eine größere Glätte bewirken. Die Meßergebnisse mit dem Rauhtester der Firma Leitz ergaben durchweg eine Abnahme der Oberflächenrauhigkeit gegenüber den eingerüttelten Proben bei E316 von 16 µ auf 9 µ und bei Durotherm von 11 µ auf 5 µ.
An lange zentrifugierten Gipskörpern (bis 10 Min.) konnte durch polarisationsoptische Untersuchungen an Dünnschliffen eine bemerkenswerte Abnahme der Kristallgrößen festgestellt werden, was als Folge nachkristalliner Durchbewegung ausgelegt wird. Bei der Untersuchung von FÜHRER spricht sowohl eine Abnahme der Porosität wie die Verringerung der Oberflächenrauhigkeit für die Zentrifugalmethode. Wir können jedoch aus diesen Ergebnissen keine direkte Berechtigung dieser Technik für die Gußtechnik ziehen, da hierbei die Frage der Verformung der Wachsmodelle wie sie RIGBERS (86) erwähnt hat und der Ausgleich der Gußkontraktion an erster Stelle stehen.
Bei den Untersuchungen von KÖNSGEN (51) müssen wir bedenken, daß wiederholtes Beschleunigen der Einbettmasse in einem Papierzylinder zur Verformung des Wachsmodelles führen kann.
Auch die Ergebnisse von FINKBEINER (21) sind eher in einem zu starken Wasserentzug durch die Zentrifuge, als in einer Verdichtung der Masse zu erklären.

216 Wachsaustreibung:

Sobald die Einbettmasse abgebunden hat und damit die Form des Wachsmodelles gesichert ist, muß das Gußwachs aus der Einbettmasse möglichst ohne Verletzung der Hohl-

form entfernt werden. Dabei haben sich im Laufe der gußtechnischen Entwicklung 3 verschiedene Methoden herauskristallisiert.

1) Auskochen
2) Austreiben mittels Wasserdampf
3) Herauslösen durch chemische Lösungsmittel.

Beim Auskochen des Wachses in kochendem Wasser oder in kochender Sodalösung nach GUSTAVSON zit. (20) besteht die Gefahr, daß vermehrt Gips in Lösung geht und die Hohlform beschädigt wird; zudem muß die Muffel ausgeschleudert werden, um die erweichten Wachsreste einigermaßen zu entfernen. Bei der HOLLENBACKSCHEN Methode zit. (20) wird die Gußform mit aufgesetzter Absaugepumpe in ein kochendes Wasserbad gebracht. Dabei durchdringt das kochende Wasser die Poren der Einbettmasse und wird samt dem erweichten Wachs in die Pumpe abgesogen. Die Austreibung des Wachses mittels Wasserdampf hat sich am stärksten durchgesetzt. In der Literatur finden wir zwei verschiedene Methoden nach denen das Wachs aus der Hohlform entfernt werden kann. Die einfachste und heute allgemein benutzte Methode ist das Austreiben des Wachses durch Erhitzen der Muffel. Das geschieht nach HEHRING (39), PREISSECKER (79), HARNDT (38), BEECK (2),KUBASCH (55), SPANNER (105) und WEISS (115) durch Erwärmen desselben über dem Bunsenbrenner oder im thermostatisch geregelten Ofen. Dabei soll die Muffel mit der Öffnung nach unten gehalten werden, wobei das verdampfende Restwasser das erweichte Wachs austreibt HARNDT (38). Bereits ROSENZWEIG (88) hat auf die Gefahr des zu raschen Ausbrennens hingewiesen, da mitgerissene Gipsteilchen rauhe Güsse verursachen können.
WEISS (115) berichtet als einer der ersten von einem thermostatisch geregelten Ofen, der nach BEECK (2) im Gegensatz zum Bunsenbrenner den Vorteil gleichmäßiger Erwärmung der

Einbettmasse hat. KUBASCH (55) weist auf die Bedeutung ausreichender Feuchtigkeit der Einbettmasse für die Wachsaustreibung hin und empfiehlt, nach längerer Lagerung die Muffel vor dem Wachsaustreiben zehn Minuten in kaltes Wasser zu stellen.
PREISSECKER (79) erwähnt eine spezielle Wachsauskochküvette ähnlich der Meyerschen Wachsauskochküvette (zit. ORBAN (75)). Hierbei wird die Muffel mit dem Gußtrichter nach oben fest an eine mit Wasser gefüllte Küvette angeschlossen. Das Wasser in der Küvette wird zum Kochen gebracht, wobei der Wasserdampf die Einbettmasse durchdringt und das erweichte Wachs mit sich reißt.
SCHWINDLING (97) bringt einen interessanten Hinweis zur Wachsaustreibung. Er stellte nämlich fest, daß die Oberfläche der Gußobjekte bei Fließpapierauskleidung der Muffel glatter waren als mit oder ohne Asbestauskleidung. Er führt dies darauf zurück, daß der Wasserdampf ungehindert nach allen Seiten abdampfen kann und nicht zum größten Teil den Weg durch den Gußhohlraum und den Gußkanal nehmen muß, wobei kleinste Einbettmassepartikel von der Hohlraumwand losgerissen werden können.
Auch MUMFORD (68) störte es, daß bei der Verwendung von heißem Wasser zur Wachsentfernung die Schärfe seiner Markierungslinien verloren ging. Er verwendete deshalb zur Entfernung des Wachses Tetrachlorkohlenstoff, der weder die Oberfläche, noch das Dimensionsverhalten der Einbettmasse beeinträchtigt. Von der Verwendung dieses Lösungsmittels wird jedoch wegen der Gefahr der Leberschädigung abgeraten. Zudem nimmt der Lösungsvorgang, der ja Schicht für Schicht vom Wachsmodell ablöst, relativ viel Zeit in Anspruch.
Die Methode von Hollenback, die modifiziert von SINGER (101) veröffentlicht wurde, sowie die Methode nach MEYER stellen zwei sehr aufwendige Versuche dar, das Wachs mög-

lichst vollständig aus der Gußhohlform zu entfernen. Dabei zeigen die Untersuchungen von SCHWINDLING (97) deutlich, daß wir uns wegen in der Gußform verbleibender Wachsreste keine Sorgen zu machen brauchen, da die handelsüblichen Dentalwachse beim Vorwärmen weitgehend rückstandslos verbrennen. Zusätzlich besteht bei den erwähnten Methoden vermehrte Gefahr, daß Gipspartikel in die Hohlform mitgerissen werden.

217 Das Auflichtverfahren in der zahnärztlichen Literatur:

Die in der Zahnheilkunde gebräuchlichen Werkstoffe eignen sich nur bedingt zur Vermessung mit mechanischen Methoden. Werkstoffe, wie Gußwachs oder Einbettmasse, welche sich durch geringe Härte auszeichnen, können sehr leicht durch den mechanischen Druck von Meßstäben, Meßbacken oder Meßfühlern verformt werden.
LANGER (58), LINDERMANN (61), KLUMPP (49) und ZÄHRINGER (118) versuchten deshalb bei Untersuchungen in der zahnärztlichen Gußtechnik diese Materialien zu umgehen, indem sie die Messungen erst am fertigen Gußobjekt anstellten. BUCK (6), HÖNIG (43), HÖFER (42) und KRÄUTLE (53) benutzten wiederum optische Methoden zur Überprüfung auftretender Dimensionsveränderungen. Die dabei zur Verwendung kommenden Auflichtmeß- und Komparatormikroskope arbeiten zwar frei von mechanischem Druck, eignen sich aber nur zur Bestimmung besonders markierter Meßstrecken. Die Vermessung von Kronenstümpfen mit optischen Methoden war lange Zeit nicht möglich, weshalb man sich durch Aufsetzen der fertigen Krone auf das Stumpfmodell odereinen konischen Meßstab behalf. Der Ring-Stab-Test wie ihn FLAUMENHAFT (23), BUDZINSKY (7) und KÖNSGEN (51) beschrieben haben, ebenso wie die von KLUMPP (49) und ZÄHRINGER (118) benutzte Methode beruhen darauf, daß man das fertige Gußobjekt auf den

konischen Meßstab oder das konische Stumpfmodell schiebt. Bei bekanntem Konuswinkel läßt sich aus der Spaltbreite zwischen Gußobjekt und Sollwert oder Vermessungsstufe die prozentuale Kontraktion der Gußstücke errechnen. Die Ergebnisse werden aber durch Gußrauhigkeiten und durch Verformungen der Wachsmodelle nach dem Einbetten erheblich verfälscht.

Erst den Bemühungen von ILG (44,45,46) und REITHER (83,84) haben wir ein Verfahren zu verdanken, das es uns ermöglicht, auf optischem Wege, also druckfrei besonders gestaltete konische Präparationskörper in allen erforderlichen Punkten zu vermessen, ohne an einzelne Markierungen gebunden zu sein.

Die zuerst von ILG beschriebene Methode arbeitet mit Hilfe der Tiefenschärfe des optischen Systems. Dabei muß der Prüfkörper senkrecht zur optischen Achse des Mikroskopes eingestellt werden. Das ist aber nur möglich, wenn jener senkrecht zu seiner Längsachse eine ebene Stirnfläche oder Stufe aufweist. Im einzelnen benutzte ILG ein umgebautes Mikroskop mit schrägem Einblickstutzen, wobei das Objektiv durch ein Ultropak-Objektiv ersetzt war, das das notwendige Licht von einer Monla-Lampe erhielt. Die Vergrößerung des optischen Systems war 162,5-fach, wobei das Ultropak-Objektiv eine numerische Apertur von 0,18 aufwies. Diese Werte hängen mit der Tiefenschärfe folgendermaßen zusammen:

$$T = \frac{1}{14} \cdot \frac{1}{A+\beta'} \cdot 1 + \frac{1}{\beta'} \text{ mm}$$

wobei T für Tiefenschärfe, A für numerische Apertur und β' für den Abbildungsmaßstab steht. Die Tiefenschärfe für die Ilgsche Apperatur beträgt demnach:

$$T = \frac{1}{14} \cdot \frac{1}{0,18+162,5} \cdot 1 + \frac{1}{162,5} = 2,45\ \mu$$

Da das Ilgsche Meßverfahren vor allem zur Messung von Durchmessern bei Kegelstümpfen Verwendung findet, errechnet sich die Breite B der an einem Kegelstumpf auftretenden Tiefenschärfelinie nach der Formel:

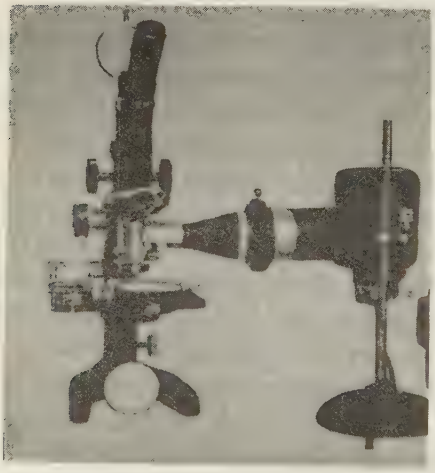
$$\alpha/2 = \frac{B}{T} \text{ ; wenn } \alpha/2 = 12^{\circ} \text{ ergibt sich für B=0 } 0{,}52\ \mu$$

Der eigentliche Meßvorgang beginnt, indem man den Prükörper mit Hilfe einer Dreipunktauflage senkrecht zur optischen Achse, das bedeutet bis das Stirnfeld des Kegelstumpfes in allen Punkten scharf erscheint, einstellt. Diese Position ist zugleich die Nulleinstellung für die Vertikalmeßuhr. Die Horizontalverschiebung wird durch eine Horizontalmeßuhr, die am Kreuztisch befestigt ist, registriert. Bei Betrachtung der Kegelstumpfmantelflächen erscheinen im Gesichtsfeld durch entsprechendes Verschieben des Kreuztisches zwei in ihrem Krümmungssinn entgegengesetzte Tiefenschärfelinien, die sich mit dem Fadenkreuz des Okulars in tangierende Stellung bringen lassen. Somit kann der Durchmesser des Modelles in einer bestimmten Höhe durch zweimaliges Ablesen der Horizontalmeßuhr errechnet werden. Als Meßfehler gibt ILG (44) die subjektive Scharfeinstellung mit $\pm$ 3 μ und den Meßfehler durch Bewegung des Kreuztisches mit $\pm$ 3,5 μ an. Weiterhin ist die Umkehrspanne der Meßuhren zu berücksichtigen, was nach ILG durch gewohnheitsmäßiges Messen mit hineingehendem Meßstift erreicht werden kann.

REITHER (84) hat die einfachere Ilgsche Apertur verbessert, indem er ein Ortholux II Mikroskop unter Verwendung von Ultropak-Objektiven in ein Meßmikroskop umbauen ließ, das durch Anbringen zusätzlicher Meßspindeln und Millimeßuhren das Ausmessen bis in den Mikrobereich und die Schätzung von 1/10 μ-Werten gestattet. Zusätzlich ließ er an den quadratischen Kreuztisch noch einen Drehtisch anbringen, der die Auswahl ganz bestimmter Durchmesser ei-

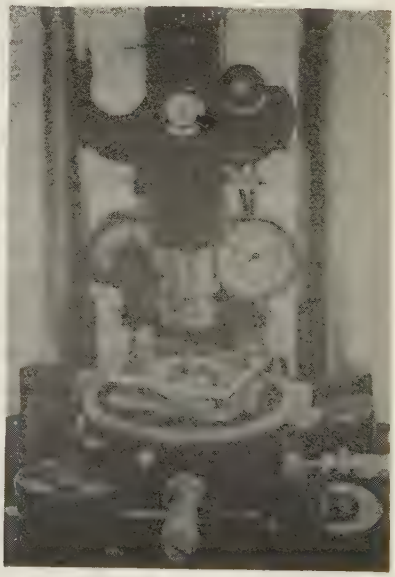
ner Meßebene ermöglicht. Weiterhin überprüfte REITHER mit Hilfe eines optisch mechanischen Null-Einstellgerätes die Genauigkeit der Meßapperatur. Die subjektive Scharfeinstellmöglichkeit beträgt demnach ± 1 µ (bei einer statistischen Sicherheit von 95% und 20 Messungen). In den beiden Kreuztischebenen beträgt der Vertrauensbereich ± 0,3 µ. In der Vertikalen ergab sich ein Vertrauensbereich von ± 9 µ, was eine Durchmesserveränderung von ± 4 µ bedeutet. Diese Werte sind Extremwerte, die eine einmalige Messung in der Vertikalen berücksichtigen und die aus 20 Einzelmessungen gefunden wurden. Als echte Dimensionsänderungen sind demnach erst Werte außerhalb von ± 4 µ zu bezeichnen.

Abb.1



Ilgsche Meßvorrichtung
aus ILG (45)

Abb.2



Reithersche Meßvorrichtung
aus REITHER (84)

Eigene Untersuchungen

221 Untersuchungen zu Fragen der Abbindeexpansion von Einbettmassen:

Bei der Untersuchung der Abbindeexpansion konnten wir auf eine weitgehend von REITHER (83,84) entwickelte und auf ihre Tauglichkeit überprüfte Versuchsanordnung zurückgreifen.

2211 Verwendete Materialien:

Wachs:

Zur Modellherstellung verwendeten wir rosa "Kerr-Casting-Wax" Gauge 24, das in Platten von o,51 mm Stärke angeliefert wird. Dieses Wachs eignet sich nach Herstellerangaben zur Bearbeitung bei Raumtemperatur und wurde von REITHER (84) bereits auf seine Brauchbarkeit für die Preßtechnik überprüft.
Angaben über Schmelzpunkt, Verarbeitungsbreite, Fließfähigkeit und thermisches Expansions- bzw. Kontraktionsverhalten konnten wir vom Hersteller trotz wiederholter Anfragen nicht bekommen.

Einbettmassen:

Aus der Vielzahl der im Handel befindlichen Massen wählten wir zwei gipsgebundene und eine zementgebundene Masse aus.
Gipsgebundene Massen:
Kerr-Cristobalite-Inlay-Investment: (Fa. Kerr)

Wasser:Pulver Verhältnis	Abbindeexpansion (Hersteller)
2:5	0,20 - 0,25%lin.

Abbindezeit: 13 Minuten (Vicat Nadel)

E 316: (Fa. Dentaurum)

Wasser:Pulver Verhältnis	Abbindeexpansion (Hersteller)
1:3	0,35%lin.

Abbindezeit: 45 Minuten

Zementgebundene Masse:

Aurovest: (Fa. Herbst)

Flüssigkeit:Pulver Verhältnis 1:5 — Abindeexpansion (Hersteller) max. 0,26 %lin.

Abbindezeit: 45 Minuten

2212 Methodik:

22121 Herstellung der Wachsmodelle:

Prüfkörper:

Zur Herstellung der Wachsmodelle benutzten wir ein rotationssymmetrisches Kegelstumpfmodell aus V_2A-Stahl. Der Durchmesser dieses Prüfkörpermodelles betrug 8 mm bei einer Höhe von 5,9 mm und einem Kegelwinkel von 24°. Für die in unseren Versuchsreihen vermessenen Höhen 0,2 mm; 2,0 mm; 4,0 mm; 5,7 mm wurden in den Durchmessern 0°, 120°, 240° folgende Werte gefunden:

Tab.2

Höhe in mm	Mittelwerte aus je 10 Messungen bei 0°	120°	240°	Mittelwerte aus 0°,120°,240°
0,2	5,1155	5,1196	5,1181	5,1177
2,0	5,8882	5,8908	5,8896	5,8895
4,0	6,7500	6,7459	6,7493	6,7484
5,7	7,4690	7,4688	7,4683	7,4687

nach REITHER (bisher unveröffentlicht)

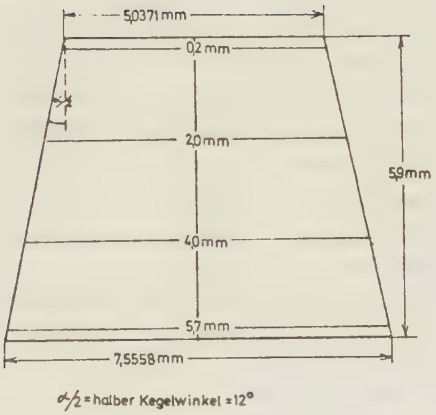


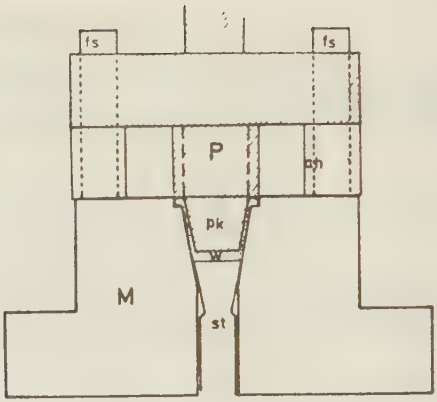
Abb.3 Vertikalschnitt des Prüfkörpers mit den 4 eingezeichneten Maßebenen

Gesenkpresse:

Um möglichst spannungsfreie und exakt auf dem Prüfkörper anliegende Wachsmodelle zu erhalten, entschieden wir uns für die plastische Verarbeitung des Gußwachses unter Druck wie sie von FUSAYAMA (25) befürwortet wird.

Die von REITHER (83,84) entwickelte Gesenkpresse eignet sich hervorragend dafür und liefert Wachsmodelle mit gleichbleibender Mantelstärke, wie sie nach DREYER-JØRGENSEN (14) aus Gründen des Dehnungswiderstandes gefordert werden muß.

Abb.4



Schema der verwendeten Gesenkpresse:

M = Matrize = Gesenkunterteil (nicht schraffiert)
st = Stempel mit dem das Wachshütchen aus der Matrize gehoben wird
fs = Führungsstift der ein Verkanten der Patritze verhindert
ah = Abstandshalter garantiert gleichmäßige Stärke der Wachshütchen
P = Patritze trägt den Prüfkörper (schräg schraffiert)
pk = Prüfkörper
w = Hohlraum für den Wachsprüfkörper

Zur Isolierung des Prüfkörpers (PK) und des Gesenkpressen-innenteils wurde Kerr Mikrofilm benutzt, der sich in einer ausreichend geringen Schichtdicke auftragen läßt.

Preßvorgang:

Die Wachsmodelle wurden nach REITHER (85) aus einer Doppelplatte Kerr-Casting-Wax Gauge 24 vorgeformt, indem wir den Modellmantel und den Deckel ausstanzten. Um die Plastizität

der bereits bei Raumtemperatur von 22°C gut verarbeitbaren Formteile noch zu erhöhen, wurden Modellmantel und Deckel in ein 45°C warmes Wasserbad gebracht, anschließend schnell auf Löschpapier getrocknet und auf dem isolierten PK mit einem heißen Le Cron-Instrument verschweißt. Das vorgeformte Wachsmodell wurde anschließend über einen Zeitraum von 15 Minuten in der auf 30° C vorgewärmten Gesenkpresse ausgeformt und dabei zweimal zwischenisoliert. Das Erwärmen der Formteile und das Vorwärmen der Gesenkpresse sowie eine anschließende Wartezeit von weiteren 15 Minuten sollten das Fließvermögen des Wachses erhöhen und verbleibende Restspannungen auf ein Minimum reduzieren.

Lagerung der Wachsmodelle:

Da die Wachsmodelle in einem 2stündigen Meßvorgang ausgemessen werden sollten, kam eine sofortige Einbettung wie sie von DÜPPERS (16) WINDISH (116) und anderen empfohlen wird, nicht in Frage. Auch ein Entspannen der Wachsmodelle im 45° C warmen Wasserbad führte zu einem weniger exakten Sitz der Wachsmodelle auf dem Prüfkörper. Außerdem bestand trotz wiederholter Isolierung mit Kerr Mikrofilm die Gefahr einer Verformung des Wachshütchens beim Herausdrükken aus dem Matrizenteil der Gesenkpresse.
Um die Restspannungen über den Vermessungszeitraum hinaus zu konservieren, kühlten wir nach REITHER (83,84) abweichend von seinem früheren Verfahren in Anlehnung an die Hinweise von BONSACK (5), DREYER-JØRGENSEN (13), FALCK-WEIKART (19) und VERGE (110) das Wachshütchen in der Metallhohlform durch Einbringen in ein Gefäß mit Kohlensäureschnee innerhalb von 2 Minuten auf +5° C ab. Unmittelbar danach wurden die Wachshütchen in einer Kühlkammer bei einer gleichbleibenden Temperatur von +7° C vermessen (REITHER (83),(84)).

22122 Einbettung der Wachsmodelle:

Nach Untersuchungen von REHBERG (82) HÖNIG (43) und MUMFORD (68) ist in den verschiedenen Bereichen innerhalb der Gußmuffel mit unterschiedlicher Abbindeexpansion zu rechnen. Wir mußten also um eine methodisch bedingte Streuung der Expansionswerte auszuschalten, das Wachshütchen immer an dieselbe Stelle in der Muffelachse bringen. Dazu benutzten wir die von REITHER (85) entwickelte Justiermethode und seine zugehörigen Hilfsvorrichtungen, die aus dem Prüfkörper , einer genormten gefensterten Muffel mit einer Führungsvorrichtung für den PK und der Gußmuldenschablone mit arretierbarem Gußstift bestehen. Die Einzelteile und der Stufenbereich des Wachsmodelles waren durch Strichmarkierungen gekennzeichnet und ermöglichten dadurch ein exaktes Zusammensetzen der Einzelteile. Eine zentrische, achsengerechte Fixierung der Wachsmodelle war auch für die spätere Entfernung des Einbettmasskernes mit Hilfe eines Hand-Hohlbohrers von Bedeutung. Das richtig justierte Wachsmodell wurde anschließend ohne unnötige Erwärmung mit dem Gußstift aus Edelstahl verschweißt und zur Verringerung der Grenzflächenspannung mit Kerr Vakufilm bepinselt. Nach Entfernen der gefensterten Muffel mit Führungsvorrichtung und PK wurde die eigentliche, ebenfalls mit einer Strichmarkierung versehene Gußmuffel auf den Gußmuldenformer aufgesetzt. Die Gußmuffel war nach den Empfehlungen von DREYER-JØRGENSEN (13) DEGUSSA (10) und SHELL (99) vollständig vom Muffelrand bis zum Gußmuldenformer mit 1 mm dicken Asbest ausgelegt. Um den Widerstand des Asbestes gegen eine Expansion der Einbettmasse zu verringern, wurde dieser angefeuchtet und zur Ausschaltung der hygroskopischen Expansion FUSAYAMA (25) mit weißer Vaseline eingestrichen. Aus der Vielzahl der bekannten Einbettungsverfahren wurde die Vakuum-Einbettung, die nach GRASSL (34) HEHRING (39) und BEECK (2) sehr gleichmäßige Ergebnisse

bringt und aus experimentellen Gründen die Zentrifugaleinbettung ausgewählt.

Vakuumeinbettung:

Als Vorrichtung zur Vakuumeinbettung diente ein Dürr-Dental Einbettgerät, das aus einer Ölrotationssaugpumpe und einem Rüttler mit Rezipienten besteht. Das neuere Multivac 2000 der Fa. Degussa, das das Anrühren des Pulvers und der Flüssigkeit sowie anschließendes Einbetten unter Vakuum ermöglicht, war zur Zeit der Durchführung der Versuche noch nicht im Handel.
Das Dürr-Gerät entwickelt einen Unterdruck von 9,5 m Wassersäule, wobei sich ein Vakuum von 9,0 m WS als ausreichend erwies.
Im einzelnen wurden verarbeitet:

1. Kerr-Cristobalite-Inlay-Investment
   W:P=2:5; Temperatur d.Anrührwassers 8° C
2. E316
   W:P=1:3; Temperatur d.Anrührwassers 8° C
3. Aurovest
   F:P=1:5; Temperatur d.kälteempfindlichen Flüssigkeit 22° C (Raumtemperatur)

Bei den Massen Kerr-Cristobalite und E316 waren im Wasserquantum 2ml wässrige 0,5%ige Eosinlösung enthalten, um die optischen Meßlinien besser zur Darstellung zu bringen. Der Anrührnapf wurde unter dem fließenden Wasser auf 8° C abgekühlt, anschließend getrocknet und die Einbettmasse im vorgeschriebenen Flüssigkeit/Pulver-Verhältnis 30 Sekunden gespatelt. Anschließend wurde die Masse bei eingeschaltetem Rüttler langsam von der Seite her in die Muffel eingefüllt. Die Gußmuffel war zusätzlich mit einer Gummimanschette versehen, die ein Überschäumen der Masse verhindern sollte. Nach dem Auffüllen der Muffel wurde der Rezipient aufgesetzt und die Masse 60 Sekunden bei einem Vakuum

von 9,0 m WS entlüftet. Im Verlauf der folgenden 30 Sekunden wurde das Vakuum langsam aufgehoben. Anschließend konnten die Massen 60 Minuten lang abbinden.

Zentrifugaleinbettung:

Zentrifuge:

Die schwedische Zentrifuge wie sie BUDZINSKY (7) und FÜHRER (24) benutzt haben, konnte aus technischen Gründen nicht verwendet werden. Wir konstruierten selbst eine Vorrichtung, die aus einem Teller mit 14,5 cm Durchmesser mit einem 5,5 cm breiten und 0,6 cm dicken Rand und einer Fangvorrichtung, die ein Loslösen des Tellers von der Achse des Wassermann Poliermotors verhindern sollte, bestand. Der Zentrifugenteller enthielt im Bereich der Rotationsachse einen Konus mit dem er auf die Achse des Poliermotors aufgepreßt werden konnte. Der Teller wiederum war zur Aufnahme des Gußmuldenformers in diametraler Richtung mit einer schwalbenschwanzförmigen Schiene und einem verstellbaren Gegengewicht, das zum Ausgleich der Unwucht diente, versehen. Der Gußmuldenformer rastete mit einer Kugelverriegelung auf dem Schwalbenschwanz ein und verhinderte somit ein Loslösen der Muffel und des Schleudergutes beim Zentrifugieren. Um zusätzliche Einbettmasse über das nur knapp unter dem Muffelrand liegende Wachsmodell zu bekommen, wurde die Muffel durch einen Kunststoffaufsatz verlängert und mit einem Deckel versehen, der ein Entweichen der Einbettmasse beim Schleudern verhindern sollte. Deckel und Aufsatz wurden über einen Bügel und zwei am Gußmuldenformer befestigte Gummiringe gesichert.

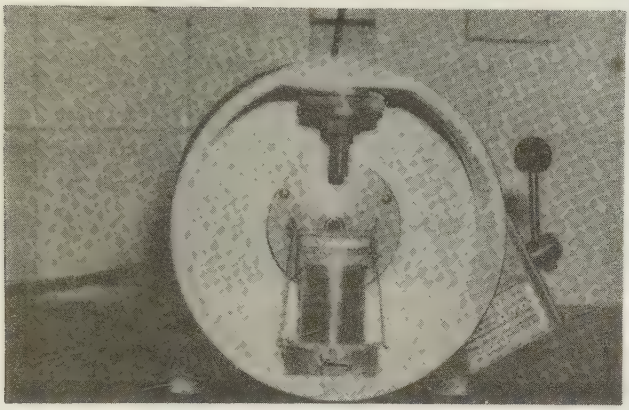


Abb.5 Modell der verwendeten Zentrifuge mit Gußmuldenformer, Muffel und Verlängerungsaufsatz mit Deckel

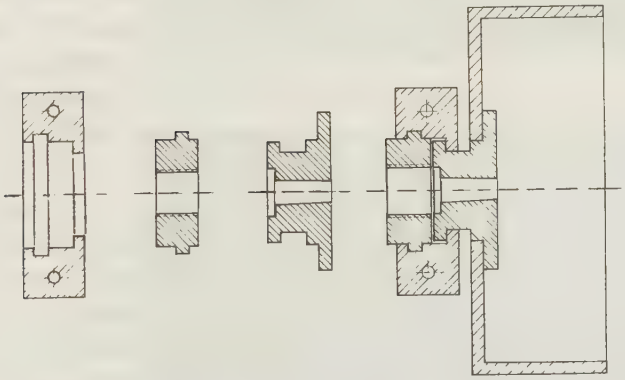


Abb.6 Konstruktionszeichnung der verwendeten Zentrifuge

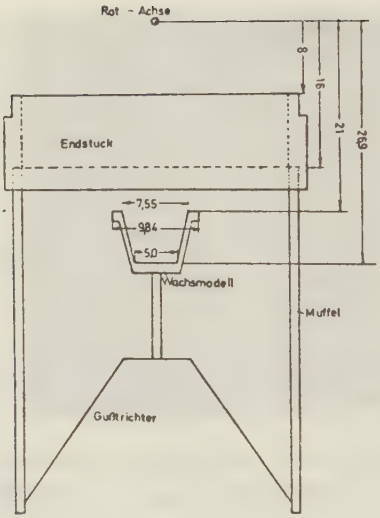


Abb.7
Abstand zwischen Rotationsachse und Wachsmodell schematisch in mm.

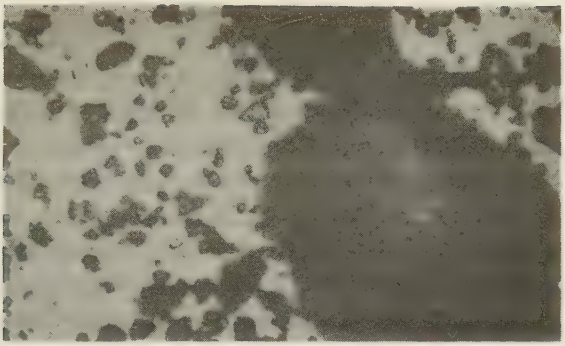
Verwendete Einbettmasse:

Von den drei bei der Vakuumeinbettung berücksichtigten Massen wurde, um die Entmischung in ihre Grundbestandteile Gips und Quarz möglichst gering zu halten, auf Grund mikrophotographischer Untersuchungen diejenige Masse ausgewählt, die die kleinsten und gleichmäßigsten Quarzpartikel enthielt. Dabei erwies sich, wie aus den Abb.8, 9 und 10 hervorgeht, Kerr-Cristobalite-Inlay-Investment als am besten geeignet.

Einbettvorgang:

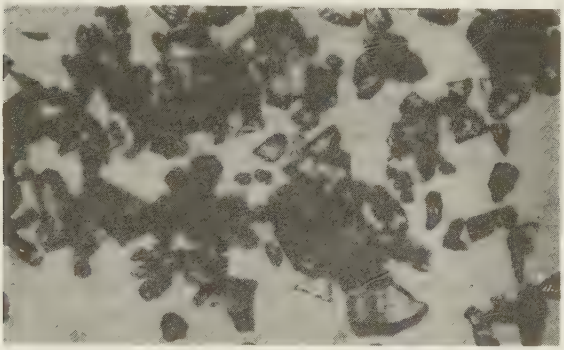
Die Innenseite der verlängerten Muffel wurde wie bei der Vakuumeinbettung mit Asbest ausgekleidet und mit Vaseline beschichtet. Die Schleuderdauer betrug im Hinblick auf später zu untersuchende Fragen der Entmischung 60 Sekunden und bewirkt nach FÜHRER (24) nur eine geringe Verminderung der Dichte im Verhältnis zu einer kürzeren Schleuderzeit bis 20 Sek. Die Umdrehungszahl der Zentrifuge betrug 3000 U/min, die Abbindedauer wiederum 60 Min. Das Wasser, das sich durch den Schleudervorgang an der Oberfläche der Masse absonderte, wurde sofort abgegossen.

Abb.8



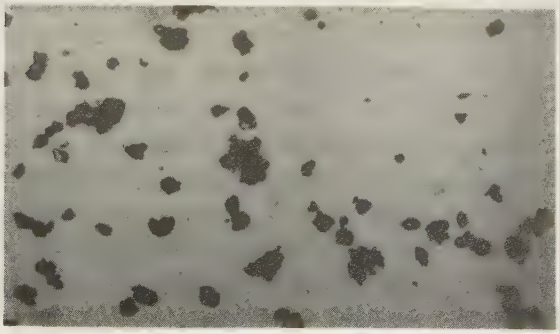
Quarzbestandteile von Aurovest
sehr unterschiedliche Körnung (Vergr.75x)

Abb.9



Quarzbestandteile von E 316
sehr gleichmäßig, mittelgroß (Vergr.75x)

Abb.10



Quarzbestandteile von Kerr Crist.
kleine und kleinste Partikel (Vergr.75x)

22123 Wachsaustreibung:

Da wir uns mit Fragen der Abbindeexpansion beschäftigen wollen, muß das Austreiben des Gußwachses möglichst schonend vor sich gehen. Wir verzichteten deshalb auf das Erhitzen der Muffel und lösten das Wachs mit chemischen Mitteln heraus. Nach MUMFORD (68) kommt es dabei weder zu einer Beeinträchtigung der Modelloberfläche noch zu Veränderungen im Dimensionsverhalten. Wir verwendeten Chloroform, das ein ausreichendes Lösungsvermögen aufweist und in genügender Menge zur Verfügung stand. Der Lösungsvorgang dauerte 60 Minuten, wobei das Chloroform im Wasserbad auf 45° C erhitzt wurde. Damit die erweichten und gelösten Wachspartikel durch den Gußkanal entweichen konnten, mußte die Muffel mit dem Gußtrichter nach oben gut von Chloroform bedeckt sein.

22124 Herausschneiden der Einbettmassekerne:

Nachdem das Wachs entfernt war, wurde der Kern der Einbettmassehohlform mit einem Handhohlbohrer nach REITHER (85) herausgebohrt. Zu diesem Zweck mußte die Bohrerführungsplatte mittels einer Strichmarkierung und dreier Bajonettverriegelungen exakt auf das dem Gußtrichter gegenüberliegende Muffelende aufgesetzt werden. Der genau geführte Bohrer war mit einem Einstellring, der die Eindringtiefe regulierte, ausgerüstet. Damit der Einbettmassekern nicht durch Reiben an der äußeren Hohlformwand zerstört wurde, mußte der Bohrer nach jeder Umdrehung gesäubert werden und durfte nur mit wenig Druck in den Stufenbereich geführt werden. Der so gewonnene Einbettmassekern wurde zur Entfernung eventuell noch anhaftender Wachspartikelchen für weitere 5 Minuten in eine Flasche mit Chloroform gehängt, anschließend getrocknet und vermessen.

22125 Meßvorgang:

Als Meßapperatur diente das bereits in der Literaturübersicht erwähnte, von REITHER (83,84,85) veränderte Ortholux II mit 6,5-fachem Ultropak-Objektiv und einem 25-fachen Periplan-Okular. Nach REITHER (84) stellen erst Abweichungen über $\pm$ 4 μ echte Dimensionsveränderungen dar. Die Objekte wurden in ihrem Dimensionsverhalten durch bestimmte Meßebenen bei 0°, 120° und 240° untersucht. Dabei entsprachen sich Prüfkörper oder Einbettmassekerne und Wachsmodelle wie Bild und Spiegelbild, was aus Abb.11 hervorgeht.
Als horizontale Meßebenen wurden die Höhen 0,2 mm; 2,0 mm; 4,0 mm; und 5,7 mm ausgewählt.

BEZIEHUNG DER EINANANDER ENTSPRECHENDEN DURCHMESSER VON PRÜFKÖRPER WACHSMODELL UND EINBETTMASSEKERN, DREHACHSE VOM BILD ZUM SPIEGELBILD IST DER DURCHMESSER 60° - 240°.

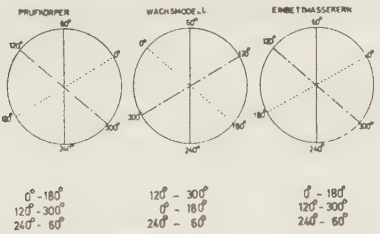


Abb.11

(Umzeichnung nach REITHER (84) (85))

Zur Einstellung der Wachsmodelle und Einbettmassekerne in der optischen Achse des Meßmikroskopes dienten Meßtische mit verstellbaren 3-Punktauflagen. Diese waren mit Strichmarkierungen ausgestattet, die eine exakte Einstellung der markierten Wachs- oder Einbettmassemodelle erlaubten und zugleich mit einer Strichmarkierung auf dem Mikroskopdrehtisch zur Deckung gebracht werden mußten. Nur so war es möglich, die untersuchten Durchmesser von Wachs- und Einbett-

massemodellen gemäß ihrem spiegelbildlichen Verhalten zu vergleichen.
Der Meßtisch für Wachsmodelle war als Kühlkammer konstruiert, die nach REITHER (84,85) eine gleichbleibende Temperatur von + 7° C garantierte.
Zu Beginn der Messungen wurde die Stirnfläche von Einbettmasse- und Wachsmodellen mit Hilfe der verstellbaren 3-Punktauflagen so eingestellt, daß bei Bewegungen des Objekttisches die gesamte Fläche im Gesichtsfeld scharf erschien. Die Vertikaleinstellung erfolgte mit Hilfe einer 1/100 mm genauen Meßuhr, wobei eine zusätzliche Millimeßuhr Veränderungen der Höheneinstellung während des Meßvorganges anzeigte. Die horizontalen Durchmesser registrierte eine Schraubenmikrometerspindel, die ebenfalls von einer Millimeßuhr ergänzt wurde und damit die Messung von µ-Werten sowie die Schätzung von 1/10 µ-Werten ermöglichte.
Die drei Durchmesser wurden in jeder Höhe 5mal vermessen.

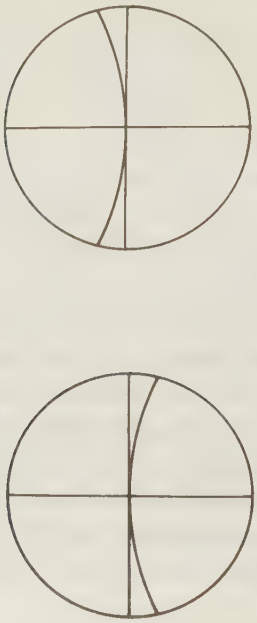


Abb.12
Bogenförmiger Verlauf der Tiefenschärfelinie, wie er beim Vermessen des konischen Kegelmantels sichtbar wird und ihre Einstellung zum Fadenkreuz des Okulars nach ILG (45)

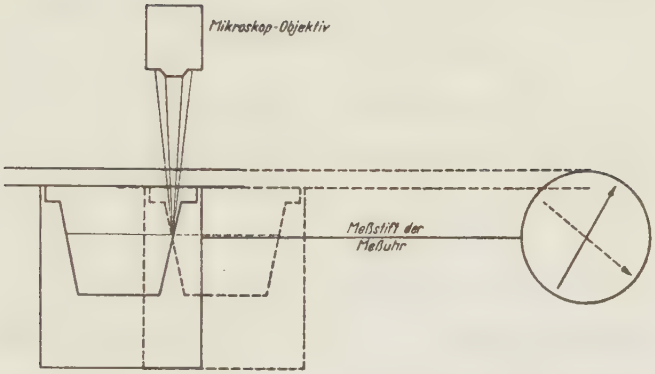


Abb.13
Meßvorgang in einer Höhe des Wachsmodelles
Schema entnommen aus ILG (45)

Schematische Übersicht zu den Untersuchungen:

4 H a u p t v e r s u c h e

a) E316
b) Kerr Cristobalite Inlay investment
c) Aurovest
d) Kerr Cristobalite Inlay investment zentrifugiert

1 H a u p t v e r s u c h

5 Wachsmodelle	5 Einbettmassemodelle
3 Winkel 0^{o}, 120^{o}, 240^{o}	3 Winkel 0^{o}, 120^{o}, 240^{o},
4 Höhen	4 Höhen
0,2 mm	0,2 mm
2,0 mm	2,0 mm
4,0 mm	4,0 mm
5,7 mm	5,7 mm
5 Einzelmessungen/Höhe	5 Einzelmessungen/Höhe
Differenz aus 2 Meßwerten ergibt Einzelmessung	Differenz aus 2 Meßwerten ergibt Einzelmessung

Insgesamt 4800 Einzelmessungen

2213 Ergebnisse:

Dimensionsverhalten von Wachsmodellen und Einbettmassekernen:

Tab.3

Höhe	Wachsmodell -Winkel	P k -Winkel	Differenz in /u	Einbettm. -Kern -Winkel	P k -Winkel	Differenz in /u
	1. Versuch Wachs			E 316		
	0°	120°		0°	0°	
0,2	5,1327	5,1196	+13,1	5,1630	5,1155	+47,5
2,0	5,8955	5,8908	+ 4,7	5,9537	5,8882	+65,5
4,0	6,7417	6,7459	- 4,2	6,8039	6,7500	+53,9
5,7	7,4483	7,4688	-20,5	7,5517	7,4690	+82,7
	120°	0°		120°	120°	
0,2	5,1320	5,1155	+16,5	5,1383	5,1196	+18,7
2,0	5,9295	5,8882	+41,3	5,9233	5,8908	+32,5
4,0	6,7757	6,7500	+25,7	6,7827	6,7459	+36,8
5,7	7,4606	7,4690	- 8,4	7,5202	7,4688	+51,4
	240°	240°		240°	240°	
0,2	5,1759	5,1181	+57,8	5,1708	5,1181	+52,7
2,0	5,9299	5,8896	+40,3	5,9597	5,8896	+70,1
4,0	6,7725	6,7493	+23,2	6,8080	6,7493	+58,7
5,7	7,4717	7,4683	+ 3,4	7,4811	7,4683	+13,5
	2. Versuch Wachs			Kerr Cristo-balite		
	0°	120°		0°	0°	
0,2	5,1137	5,1196	- 5,9	5,1485	5,1155	+33,0
2,0	5,8963	5,8908	+ 5,5	5,9434	5,8882	+55,2
4,0	6,7465	6,7459	+ 0,6	6,7942	6,7500	+44,2
5,7	7,4437	7,4688	-25,1	7,5006	7,4690	+31,6
	120°	0°		120°	120°	
0,2	5,1122	5,1155	- 3,3	5,1506	5,1196	+31,0
2,0	5,9032	5,8882	+15,0	5,9444	5,8908	+53,6
4,0	6,7485	6,7500	- 1,5	6,8025	6,7459	+56,6
5,7	7,4567	7,4690	-12,3	7,5335	7,4688	+64,7
	240°	240°		240°	240°	
0,2	5,1175	5,1181	- 0,6	5,1397	5,1181	+21,6
2,0	5,8875	5,8896	- 2,1	5,9260	5,8896	+36,4
4,0	6,7444	6,7493	- 4,9	6,7886	6,7493	+39,3
5,7	7,4889	7,4683	+20,6	7,4851	7,4683	+16,8

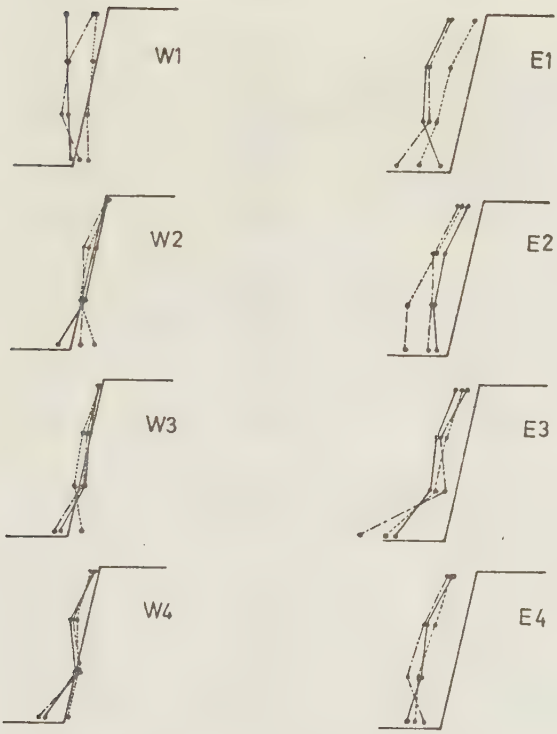
Dimensionsverhalten von Wachsmodellen und Einbettmassekernen:

Tab.4

Höhe	Wachsmodell -Winkel	P k -Winkel	Differens in /u	Einbettm. -Kern -Winkel	P k -Winkel	Differens in /u
	3. Versuch W a c h s			Aurovest		
	0°	120°		0°	0°	
0,2	5,1211	5,1196	+ 1,5	5,1318	5,1155	+16,3
2,0	5,9013	5,8908	+10,5	5,9277	5,8882	+39,5
4,0	6,7514	6,7459	+ 5,5	6,7643	6,7500	+14,3
5,7	7,4524	7,4688	-16,4	7,5958	7,4690	+126,8
	120°	0°		120°	120°	
0,2	5,1211	5,1155	+ 5,6	5,1407	5,1196	+21,1
2,0	5,8923	5,8882	+ 4,1	5,9230	5,8908	+32,2
4,0	6,7453	6,7500	- 4,7	6,7732	6,7459	+27,3
5,7	7,4884	7,4690	+19,4	7,5568	7,4688	+88,0
	240°	240°		240°	240°	
0,2	5,1212	5,1181	+ 3,1	5,1506	5,1181	+32,5
2,0	5,8932	5,8896	+ 3,6	5,9343	5,8896	+44,7
4,0	6,7433	6,7493	- 6,0	6,7852	6,7493	+35,9
5,7	7,4822	7,4683	+13,9	7,5458	7,4683	+77,5
	4. Versuch W a c h s			Kerr Cristo-balite		
	0°	120°		0°	0°	
0,2	5,1294	5,1196	+ 9,8	5,1552	5,1155	+39,7
2,0	5,9092	5,8908	+18,4	5,9419	5,8882	+53,7
4,0	6,7438	6,7459	- 2,1	6,8071	6,7500	+57,1
5,7	7,4650	7,4688	- 3,8	7,4940	7,4690	+25,0
	120°	0°		120°	120°	
0,2	5,1242	5,1155	+ 8,7	5,1543	5,1196	+34,7
2,0	5,9075	5,8882	+19,3	5,9341	5,8908	+43,3
4,0	6,7452	6,7500	- 4,8	6,7938	6,7459	+47,9
5,7	7,4957	7,4690	+26,7	7,5048	7,4688	+35,6
	240°	240°		240°	240°	
0,2	5,1244	5,1181	+ 6,3	5,1525	5,1181	+34,4
2,0	5,9103	5,8896	+20,7	5,9450	5,8896	+55,4
4,0	6,7481	6,7493	- 1,2	6,7956	6,7493	+46,3
5,7	7,4967	7,4683	+28,4	7,5177	7,4683	+49,4

Abb.14

DIMENSIONSVERHALTEN VON WACHSMODELLEN UND EINBETTMASSEKERNEN



Differenz zwischen Wachsmodell und Einbettmassekern in den 4 gemessenen Höhen und den einander entsprechenden Durchmessern in µ.

Tab.5

Höhe in mm:	Durchmesser bezogen auf Wachsmodell bei:		
1.Versuch	0°	120°	240°
0,2	5,6	31,0	-5,1
2,0	27,8	24,4	29,8
4,0	41,0	28,2	35,5
5,7	71,9	91,1	10,1
2.Versuch	0°	120°	240°
0,2	36,9	36,3	22,2
2,0	48,1	38,6	38,5
4,0	56,0	58,1	44,2
5,7	89,8	87,0	-3,8
3.Versuch	0°	120°	240°
0,2	19,6	10,7	29,4
2,0	21,7	35,4	41,1
4,0	21,8	19,0	41,9
5,7	104,4	107,4	63,6
4.Versuch	0°	120°	240°
0,2	24,9	31,0	28,1
2,0	24,9	34,4	34,7
4,0	50,0	61,9	47,5
5,7	39,4	-1,7	31,0

Übersicht über die maximale und die minimale Abweichung der Einzelwerte von den Mittelwerten bei Wachsmodellen:

Tab.6

Höhe	Durchmessermittel (mm)	Wachsmodell 1 Abweichung absolut(µ) Maximum	Minimum	relativ(%) Maximum	Minimum	Mittlere Abweichung vom Pk-Wert absol.µ	rel.%
0,2	5,1469	74,1	31,4	1,47	0,61	+29,2	+0,57
2,0	5,9183	118,0	9,3	1,77	0,16	+28,8	+0,49
4,0	6,7633	115,5	13,31	1,72	0,17	+14,9	+0,22
5,7	7,4602	102,7	33,1	1,38	0,45	- 8,5	-0,11

Höhe	Durchmessermittel (mm)	Wachsmodell 2 Abweichung absolut(µ) Maximum	Minimum	relativ(%) Maximum	Minimum	Mittlere Abweichung vom Pk-Wert absol.µ	rel.%
0,2	5,1144	31,7	17,9	0,62	0,35	- 3,3	-0,06
2,0	5,8957	16,9	43,6	0,29	0,74	+ 6,2	+0,12
4,0	6,7465	32,5	36,9	0,48	0,55	- 1,9	-0,03
5,7	7,4631	110,9	205,5	1,49	2,75	- 5,6	-0,08

Höhe	Durchmessermittel (mm)	Wachsmodell 3 Abweichung absolut(µ) Maximum	Minimum	relativ(%) Maximum	Minimum	Mittlere Abweichung vom Pk-Wert absol.µ	rel.%
0,2	5,1211	31,5	11,3	0,62	0,22	+ 3,4	+0,07
2,0	5,8956	32,1	48,8	0,54	0,83	+ 6,1	+0,11
4,0	6,7467	30,9	15,9	0,46	0,24	- 1,7	-0,03
5,7	7,4743	122,9	35,2	1,65	0,47	+ 5,6	+0,08

Höhe	Durchmessermittel (mm)	Wachsmodell 4 Abweichung absolut(µ) Maximum	Minimum	relativ(%) Maximum	Minimum	Mittlere Abweichung vom Pk-Wert absol.µ	rel.%
0,2	5,1260	25,0	12,8	0,49	0,25	+ 8,3	0,16
2,0	5,9090	51,6	19,1	0,88	0,33	+19,5	0,33
4,0	6,7457	21,8	32,3	0,32	0,48	- 2,7	0,04
5,7	7,4858	48,5	54,4	0,65	0,73	+17,1	0,23

Übersicht über die maximale und die minimale Abweichung der Einzelwerte von den Mittelwerten bei Einbettmassekernen:

Tab.7

Höhe	Durchmesser-mittel (mm)	Einbettmassekern 1 Abweichung absolut(µ) Maximum	Minimum	relativ(%) Maximum	Minimum	Mittlere Abweichung vom Pk-Wert absol.µ	rel.%
0,2	5,1574	36,9	59,2	0,72	1,15	+39,7	-0,77
2,0	5,9455	22,5	30,0	0,38	0,51	+56,0	+0,95
4,0	6,7982	22,4	47,6	0,33	0,71	+49,8	+0,87
5,7	7,5177	45,2	90,6	0,61	1,21	+49,0	+0,66

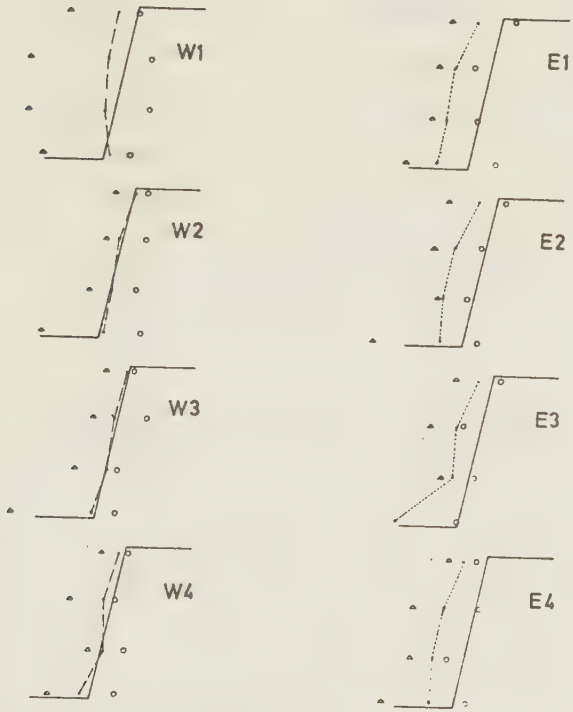
Höhe	Durchmesser-mittel (mm)	Einbettmassekern 2 Abweichung absolut(µ) Maximum	Minimum	relativ(%) Maximum	Minimum	Mittlere Abweichung vom Pk-Wert absol.µ	rel.%
0,2	5,1462	26,9	33,8	0,52	0,66	+28,5	+0,56
2,0	5,9379	31,2	40,3	0,53	0,68	+48,4	+0,82
4,0	6,7951	5,8	35,3	0,09	0,52	+46,7	+0,69
5,7	7,5064	103,5	58,2	1,44	0,78	+37,7	+0,50

Höhe	Durchmesser-mittel (mm)	Einbettmassekern 3 Abweichung absolut(µ) Maximum	Minimum	relativ(%) Maximum	Minimum	Mittlere Abweichung vom Pk-Wert absol.µ	rel.%
0,2	5,1410	32,5	29,9	0,63	0,58	+23,3	+0,46
2,0	5,9283	38,0	8,7	0,64	0,15	+38,8	+0,66
4,0	6,7472	14,8	33,2	0,22	0,49	+25,8	+0,38
5,7	7,5661	206,8	95,1	2,76	1,27	+97,4	+1,33

Höhe	Durchmesser-mittel (mm)	Einbettmassekern 4 Abweichung absolut(µ) Maximum	Minimum	relativ(%) Maximum	Minimum	Mittlere Abweichung vom Pk-Wert absol.µ	rel.%
0,2	5,1540	20,0	17,8	0,39	0,35	+36,3	0,69
2,0	5,9403	47,6	52,2	0,81	0,89	+50,8	0,86
4,0	6,7985	31,9	23,3	0,47	0,35	+50,1	0,75
5,7	7,5055	66,3	55,2	0,89	0,74	+36,8	0,49

Abb. 15

ABWEICHUNG DER GEMESSENEN MAXIMAL-UND MINIMALWERTE
BEI WACHSMODELLEN UND EINBETTMASSEKERNEN



Differenz zwischen dem Wachsmodellmittelwert und dem Prüfkörpermittelwert bei den 4 Versuchsreihen in µ:

Tab.8

Höhe in mm	1. Versuch	2. Versuch
0,2	29,2	-3,3
2,0	28,8	6,2
4,0	14,9	-1,9
5,7	-8,5	-5,6

	3. Versuch	4. Versuch
0,2	3,4	8,3
2,0	6,1	19,5
4,0	-1,7	-2,7
5,7	5,6	17,1

Werte für die "effektive" lineare Abbindeexpansion als Mittelwert aus je 5 Modellversuchen sowie sämtlichen vermessenen Durchmessern und Höhen. Bezogen auf den Wachsmodellmittelwert aus der betreffenden Versuchsserie.

Tab.9

Versuch:	linear absolut µ	linear relativ %
1. E 316	32,5	0,51
2. Kerr Cristobalite	41,4	0,65
3. Aurovest	36,2	0,57
4. Kerr Cristobal. zentrif.	32,9	0,52

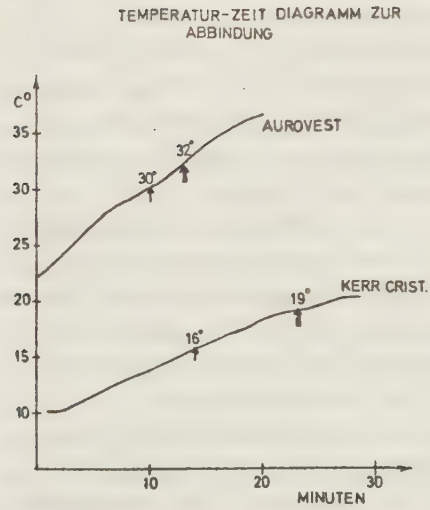


Abb.16
Unter Versuchsbedingungen zeigt der dünne Pfeil den Beginn der Verfestigung, der dikke Pfeil das Ende der Verfestigung an. (Die Messungen wurden mit einem geeichten Thermometer durchgeführt).

2214 Diskussion der Ergebnisse:

Genauigkeit der Wachsmodelle:

Nach Durchsicht der Literatur und Prüfung der im Kapitel "Verarbeitungstechniken" dargestellten Ergebnisse hinsichtlich der günstigsten Methode der Wachsverarbeitung, haben wir uns für eine Modifizierung der Knet-Formtechnik entschieden. Durch Vorstanzen und Nahtverschweißung wurde der Wachskörper in eine, der Endform möglichst ähnliche, Rohform gebracht und anschließend in einer speziell konstruierten Gesenkpresse ausgeformt. Danach wurden alle Wachsmodelle zuerst mit der Lupe, dann unter dem Meßtisch einer genauen Kontrolle unterzogen und auf ihre Brauchbarkeit untersucht. Diese Methode stellt hinsichtlich der Restspannungen und der Genauigkeit der so gewonnenen Wachsmodelle das optimalste uns bekannte Verfahren dar; es besitzt aber auch gewisse Schwächen.

Betrachten wir uns in Abb.14 das Dimensionsverhalten der Wachsmodelle im Verhältnis zum Prüfkörper, so können wir aus den Versuchen 2, 3 und 4 eine hohe Übereinstimmung der Wachsmodelle mit dem Prüfkörper entnehmen.

Die geringfügig stärkeren Abweichungen im Versuch 1, sind durch Schwierigkeiten beim Meßvorgang zu erklären; besonders in der ersten Versuchsreihe wurden die Messungen durch starke Kondenswasserbildung am Wachsmodell, abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit, behindert.

Wie andererseits aus Tab.3 und Tab.4 sowie aus Abb.14 hervorgeht, weisen die aus den 4 Versuchsserien errechneten Wachsmodellwerte keinen gleichmäßigen Abstand zu den Pk-Werten auf. Das bedeutet, daß wir bei Verwendung von Gußwachs als Modellmaterial, auch mit der Knet-Formtechnik und anschließender Abkühlung der Wachsmodelle mit CO_2-Schnee, kein völlig modellgetreues oder isometrisch verändertes Abbild unseres Prüfkörpers erzielen können. Die Ursachen dafür liegen zum Teil im Gußwachs, das nach FALCK-

WEIKART (19) ein sehr unbeständiges und labiles Material ist und zum Teil in gewissen Schwächen des von uns benutzten Verfahrens.
Durch ein geringfügiges, für das Funktionieren der Preßapperatur notwendiges Spiel zwischen den beiden Führungsstiften und dem Patritzenteil ist eine Ausweitung der Wachsmodelle möglich.
Weiterhin läßt sich auch bei sparsamstem Auftragen der Isolierflüssigkeit ein Verpressen des Isoliermittels nicht verhindern. Das führte im Stufenbereich wiederholt zur Ablösung feinster Wachsteilchen, die keine oder nur mangelnde Verbindung zum Wachsmodell hatten. Außerdem kommt es durch die Ansammlung von überschüssigem Isoliermittel zu Aussackungen des Wachsmodellmantels.
Aus diesen Gründen genügte im Durchschnitt nur jedes zehnte mit der Lupe und dem Auflichtmikroskop überprüfte Wachsmodell unseren Ansprüchen und wurde für die Versuche herangezogen.
Aus Tab.3 und Tab.4 sowie Abb.14 können wir entnehmen, daß alle Wachsmodelle aus den 4 Versuchen wenigstens in einer Höhe und einem Durchmesser geringere Werte als der Prüfkörper aufweisen. Die negativen Werte liegen über dem für die Meßapperatur ermittelten Meßfehler von $\pm$ 4µ und stellen damit echte Dimensionsänderungen dar.
Weniger deutlich wird dieses Verhalten bei Betrachtung der Mittelwerte in Abb.15 und Tab.8, da die gemittelten negativen Werte für die Versuche 3 und 4 den Wert des Meßfehlers von 4µ nicht überschreiten.
Als durchschnittliche Spaltbreite zwischen Wachsmodell und Prüfkörper ergibt sich ein Wert von 3,6µ, der erheblich unter dem von REITHER (84) mit 22u angegebenen Wert liegt. Der Unterschied zwischen dem von uns ermittelten und dem von REITHER veröffentlichten Wert für die durchschnittliche Spaltbreite liegt in einer geänderten Versuchsbedingung.

Während REITHER (84) die Wachsmodelle im Wasserbad entspannt und dann indirekt durch Eisauflage auf das Gesenkpressenunterteil langsam auf eine Temperatur von annähernd 0^{o} C abgekühlt hat, verzichteten wir bewußt auf eine Entspannung im Wasserbad; zur Konservierung der Restspannungen kühlten wir das Wachshütchen in der Hohlform mit Hilfe von CO_2-Schnee schnell ab.
Das bewirkte ein Aufschrumpfen des Wachses auf den Prüfkörper und führte zur Fixierung der Spannungen im Gußwachs. Man verbesserte mit dieser Methode das Verfahren nicht; denn die Spannungen werden nach dem Entfernen des Prüfkörpers oder beim Meßvorgang trotz Abkühlung frei. Dadurch finden die geringe Spaltbreite zwischen Pk und Wachsmodell sowie die negativen Werte für die Differenz zwischen Wachsmodell und Pk in Tab.3 und Tab.4 eine Erklärung.
Aus Abb.15 können wir im stufennahen Bereich eine leichte Erhöhung der Maximal- und Minimalwerte entnehmen, die auf die Wachsabschilferung im Stufenbereich und damit verbunden einen erschwerten Meßvorgang, zurückzuführen ist.

Verformung der Wachsmodelle beim Abbinden der Einbettmasse:

Ein Vergleich der Kurven über das Dimensionsverhalten von Wachsmodellen und Einbettmassekernen in Abb.14 zeigt, daß der Kurvenverlauf nicht parallel ist. Deutlicher kann dieses Verhalten aus Tab.5 entnommen werden, wobei in den entsprechenden Durchmessern und Höhen die Differenz zwischen Wachsmodell und Einbettmassekern gebildet wurde. Bei isometrischer Expansion der Einbettmasse oder fehlender Verformung der Wachsmodelle müßten die Differenzwerte innerhalb eines Versuches annähernd gleich bleiben.
Aus der Abweichung der Einzelwerte innerhalb der Versuchsreihen geht eine Verformung der Wachsmodelle hervor. Die erhöhte Abweichung der Werte im stufennahen Bereich bei 5,7 mm hängt mit dem Herausschneiden der Formkerne zusam-

men. Die Verformung der Wachsmodelle kann durch eine ungleichmäßige oder behinderte Abbindeexpansion ebenso wie durch das Freiwerden von Spannungen im Wachsmodell verursacht werden.
An Hand der vorliegenden Untersuchungen konnte die eigentliche Ursache der Verformungen, die auch in der Literatur unterschiedlich interpretiert wird, nicht geklärt werden.

Abbindeexpansion:

Unsere Versuchsanordnung gestattet ausschließlich Aussagen über die "effektive" lineare Abbindeexpansion der Einbettmassen zum Meßzeitpunkt (etwa 125 Minuten nach dem Anrühren.
Im Gegensatz zu den Aussagen anderer Autoren über das lin. Dimensionsverhalten, wurden diese Messungen an einem rotationssymmetrischen Prüfkörper vorgenommen und erlauben durch die Wahl entsprechender Höhen und Durchmesser (siehe 22125 Meßvorgang) Aussagen über das räumliche Dimensionsverhalten der Einbettmassen (Tab.3 und Tab.4 sowie Abb.14).

Die Werte aus Tab.6 und Tab.7 stellen Durchschnittswerte aus 3 Durchmessern und 5 Einzelversuchen dar. Die Kurven in Abb.15 wurden durch Halbierung der mittleren Durchmesserdifferenzen zwischen Wachsmodell und Pk sowie Einbettmassekern und Pk gewonnen. Als Werte für die "effektive" lineare Abbindeexpansion in transversaler Richtung unter Bezug auf den jeweiligen Wachsmodellmittelwert ergeben sich aus Tab.9:
Bei Vakuumeinbettung:

für E 316	0,51 % lin.
für Kerr Cristobalite	0,65 % lin.
für Aurovest	0,57 % lin.

Bei Zentrifugaleinbettung: —
für Kerr Cristobalite 0,52 % lin.
Alle gemessenen Abbindeexpansionswerte haben nur relativen Aussagewert und müssen im Zusammenhang mit der Versuchsanordnung gesehen werden.
Die ermittelten Werte für gipsgebundene Massen sind im Vergleich zu den in der Literatur veröffentlichten Werten (Tab.1) zu hoch.
Am auffallendsten weicht der lineare Expansionswert von Aurovest von den Herstellerangaben ab.
Die Ursache dafür liegt unseres Erachtens in einer thermischen Expansion der Wachsmodelle.
Betrachten wir das Temperatur-Zeitdiagramm für die Abbindung zweier Einbettmassen in Abb.16, so können wir für die gipsgebundenen Massen feststellen, daß sich das Wachsmodell vom Ende der Messung, bei der es eine Temperatur von gleichbleibend + 7° C aufweist, bis zum völligen Erstarren der Einbettmasse bei ca. 19° C, um mindestens 10° C erwärmt. Selbst wenn wir einen niedrigen Expansionsfaktor von 0,02% lin. bei Erwärmung um 1° C zugrunde legen, müßten wir mit einer thermischen Wachsexpansion von 0,2 % lin. rechnen. Um diesen Betrag würde sich dann der reine Abbindeexpansionswert verringern.

Die Verhältnisse bei Aurovest liegen bedeutend ungünstiger. Bei diesem Material mußten wir laut Verarbeitungshinweis auf eine Abkühlung verzichten. Die Temperaturdifferenz bis zum Abbinden der Masse beträgt hierbei ca. 24° C, was einem thermischen Wachsexpansionswert von 0,48% lin. rechnerisch entspricht.
Die Verringerung der Abbindeexpansionswerte bei Kerr Cristobalite durch das Zentrifugieren wird noch deutlicher, wenn wir die Mittelwerte aus Tab.5 im 4. Versuch aus den ent-

sprechenden Höhen mit Ausnahme des meßtechnisch schlecht erfaßtbaren Bereiches bei 5,7 mm bilden. Wir erhalten dann bei 0,2 mm mit 28,0 µ, bei 2,0 mm mit 31,3 µ und bei 4,0 mm mit 53,1 µ eine ansteigende Zahlenreihe, die auf eine verringerte Abbindeexpansion bei Annäherung an die Rotationsachse hinweist.

Die Ursache dieser Expansionsabnahme kann erst nach Abschluß der Porositäts- und Dichtebestimmungen sowie der quantitativen Analyse geklärt werden.

Prüfung der Meßgenauigkeit:

An Hand der Standardabweichung kann bei bekannter Zahl (n) der Einzelmeßwerte und gewählter statistischer Sicherheit von P=99,73% der Vertrauensbereich für die Mittelwerte nach DIN-Normblatt 1319 S.4-5 berechnet werden.
Die Mittelwerte aus Tab.6 und 7 entsprechen zwar nicht 100%ig dem wahren Wert der Meßgröße, dieser liegt jedoch bei Abwesenheit von systematischen Fehlern, mit gewählter statistischer Sicherheit P,im Vertrauensbereich des Mittelwertes also zwischen der oberen und unteren Vertrauensgrenze.
Je kleiner der Vertrauensbereich für unseren Mittelwert ist, umso exakter sind unsere Meßwerte.

Betrachten wir nun die Vertrauensbereiche in Tab.10, so können wir feststellen, daß mit Ausnahme des Wachsmodelles 1 und der stufennahen Bereiche bei 5,7 mm der doppelte Betrag des durch die Meßapperatur bedingten Meßfehlers von $\pm$ 4 µ nur zweimal überschritten wird. In50% der Fälle wird nur der 1 1/2-fache Betrag des Meßfehlers von $\pm$ 4 µ erreicht.

Die Abweichungen beim Wachsmodell im Versuch 1 (bis zu 15,5 µ) sind in einer durch hohe Luftfeuchtigkeit bedingten Kondenswasserbildung am Wachshütchen zu sehen, welche die Messungen besonders in dieser Versuchsreihe behinderte. Die Werte bis zu 43,23 µ im stufennahen Bereich sind wie bereits erwähnt, methodisch bedingt (Wachsabschilferung, Läsionen der Formkerne).

Zusammenfassend läßt sich aus den Ergebnissen in Tab.10 eine hohe Genauigkeit unserer Meßwerte ableiten.

Vertrauensgrenzen der Durchmessermittelwerte aus Tab.6 und Tab.7 bei einer Zahl von n = 75 Einzelwerten und einer statistischen Sicherheit von P=3 = 99,73%; Berechnung der Werte nach DIN-Norm 1319, Seite 4-5.

Tab.10

V e r s u c h 1		V e r s u c h 2	
Wachs 1	E 316	Wachs 2	Kerr Cristobalite Inlay-Investment
Höhe 0,2 mm		Höhe 0,2 mm	
± 11,02 µ	± 8,46 µ	± 4,09 µ	± 5,92 µ
Höhe 2,0 mm		Höhe 2,0 mm	
± 14,88 µ	± 6,54 µ	± 5,44 µ	± 6,88 µ
Höhe 4,0 mm		Höhe 4,0 mm	
± 14,18 µ	± 4,93 µ	± 5,24 µ	± 6,42 µ
Höhe 5,7 mm		Höhe 5,7 mm	
± 15,44 µ	± 22,79 µ	± 23,13 µ	± 15,83 µ

V e r s u c h 3		V e r s u c h 4	
Wachs 3	Auroves	± Wachs 4	Kerr Cristobalite Inlay Investment zentrifugiert
Höhe 0,2 mm		Höhe 0,2 mm	
± 5,94 µ	± 4,81 µ	± 3,43 µ	± 3,55 µ
Höhe 2,0 mm		Höhe 2,0 mm	
± 6,42 µ	± 6,48 µ	± 7,87 µ	± 10,59 µ
Höhe 4,0 mm		Höhe 4,0 mm	
± 7,41 µ	± 5,12 µ	± 4,86 µ	± 6,21 µ
Höhe 5,7 mm		Höhe 5,7 mm	
± 21,30 µ	± 43,23 µ	± 9,77 µ	± 13,70 µ

2215 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Abbindeexpansion von Einbettmassen:

- Die Preßtechnik stellt eine optimale Methode der Wachsverarbeitung dar. Gewisse Schwächen lassen sich durch eine sorgfältige Auswahl der Wachsmodelle weitgehend kompensieren.
- Nicht nur bei der Erwärmung, sondern auch bei der Abkühlung von Wachsmodellen mit CO_2-Schnee muß entgegen der vorwiegenden Literaturmeinung mit ihrer Kontraktion und Verformung gerechnet werden.
- Als Ergebnis der Abbindeexpansion finden wir eine Deformation der Einbettmassekerne vor, die ihre Ursache in Spannungen des Gußwachses oder in einer von außen gestörten Abbindeexpansion der Einbettmasse (Muffelwerkstoff, Gußwachs) haben muß; das heißt Aussagen über die linearen Expansionswerte allein, sagen nichts aus über das räumliche für die Praxis entscheidende Dimensionsverhalten einer Einbettmasse.
- Die von uns bestimmten Durchschnittswerte für die Abbindeexpansion von 3 verschiedenen Einbettmassen bei Vakuumeinbettung, entsprechen unter Berücksichtigung der auftretenden thermischen Expansion der Wachsmodelle, den Werten aus der Literatur.
- Das Zentrifugieren einer gipsgebundenen Einbettmasse hat im Vergleich zur Vakuumeinbettung einen niedrigeren, in Richtung zur Rotationsachse zunehmenden Abbindeexpansionsgradienten zur Folge.

222 Untersuchungen zur Zentrifugaleinbettung:

2221 Verformung der Wachsmodelle durch die Zentrifugalkraft

Aus Tab.3, 4 und 5 sowie aus Abb.14 können wir keine erhöhte Verformung unserer Wachsmodelle beim Zentrifugieren ableiten. Um die Frage der Wachsmodellverformung diskutieren zu können, versuchten wir die kritische Drehzahl (n) bei gegebener Masse des Wachshütchens (m_w) und festem Abstand zur Rotationsachse (t) rechnerisch zu erfassen.

Zur Abschützung der Kraft, die eine Deformation des Wachsmodelles bewirken kann, machten wir folgenden Versuch:

5 Wachshütchen wurden mit der Öffnung nach oben und einem Deckglas als Zwischenlage, jeweils 60 Sekunden, ansteigenden Belastungen ausgesetzt.

Die Temperatur der Hütchen, die für das Fließverhalten des Wachses und dessen Verformung von Bedeutung ist (REHBERG (81)), betrug wie die Temperatur der zur Einbettung verwendeten Masse $+10^{\circ}$ C. Kriterium für die Verformung war die eben sichtbare Spaltbildung im Stufenbereich zwischen Wachshütchen und PK-Modell, welche nach DREYER-JØRGENSEN (13) 50 u beträgt.

Als Mittelwert für die Masse (m), die eine eben sichtbare Verformung hervorrief, erhielten wir einen Wert von 800g.

Die gemittelte Masse (m_w) des Wachshütchens wurde mit 0,13g bestimmt.

Als Abstand (r) zwischen Rotationsachse und Wachshütchen wurde der maximal mögliche Wert mit 27mm aus Abb.7 entnommen.

Zur Abschützung der Umdrehungszahl (n) bei der sich das Wachsmodell gegen Luft zu deformieren beginnt, kann man ansetzen:

$$G = K_z$$

G = aufgelegtes Gewicht

K_z = Zentrifugalkraft

aus $G = m \cdot g$ und $K_z = m \cdot r \cdot 4\pi^2 \cdot n^2$

folgt: $m \cdot g = m_w \cdot r \cdot 4\pi^2 \cdot n^2$ (1)

m = 800 g

g = 981 $\frac{cm}{sec^2}$

r = 2,7 cm

Die Formel (1) aufgelöst nach (n) ergibt:

$$n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot g}{r \cdot m_w}}$$

Für unsere Werte ergibt sich:

$$n = \frac{1}{6,28} \cdot \sqrt{\frac{800 \cdot 9,81 \ \frac{g \cdot cm}{sec^2}}{2,7 \cdot 0,13 \ g \cdot cm}}$$

$$n = 240 \ \frac{1}{sec} \quad \text{(Rechenschiebergenauigkeit)}$$

Für die Drehzahl unseres Poliermotors ergibt sich $n = \frac{50}{sec}$

das bedeutet, daß eine Verformung unserer Wachsmodelle durch die Zentrifugalkraft mit größter Sicherheit nicht zu erwarten war.

Betrachten wir schließlich die nach (n) aufgelöste Formel (1) im Hinblick auf eine Anwendung der Zentrifugaleinbettung in der Praxis, so kann bei einem konstanten Wert für (m) eine Vergrößerung von (r) und (m_w) zu einem Überschreiten der kritischen Drehzahl durch die gewählte Drehzahl führen. Außerdem hängt der Faktor (m) sehr stark von der verwendeten Wachssorte und der Temperatur des Gußwachses ab.

Wir können deshalb in der Praxis nie abschätzen, ob die von uns gewählten Bedingungen nicht zu einer Verformung der Wachsmodelle durch die Zentrifugalkraft führen.

2222 Fragen der Entmischung:

22221 Dichtebestimmung von zentrifugierten Einbettmassekörpern:

Ziel der Untersuchungen:

Da sich beim Zentrifugieren auf einem bestimmten Radius zur Rotationsachse regelmäßig ca. 1,5 ml Wasser an der Oberfläche der Einbettmasse abgesondert hatten, sollte

bei der Dichtebestimmung in verschiedenen Höhen des Einbettmassekörpers ermittelt werden, ob die einwirkende Zentrifugalkraft fähig ist, auch die in den Massen enthaltenen Feststoffanteile Gips und Quarz zu entmischen oder die Porosität der Masse unterschiedlich zu beeinflussen.

Versuchsdurchführung:

Kerr Cristobalite wurde wie unter Versuch 4. verarbeitet und zentrifugiert. Auf Gußstift und Wachsmodell konnten wir, da es uns nur auf einen entsprechenden Einbettmassekörper ankam, verzichten. Nach dem Abbinden wurde jeder der 5 zentrifugierten Probekörper mittels einer Hilfsvorrichtung auf die gleiche Gußtrichterhöhe abgerieben und in den Höhen 1 cm und 2 cm durchschnitten. So erhielten wir von jedem Probekörper 3 Scheiben, wobei beim Probekörper 5 die Scheibe aus dem Bereich des Gußtrichters den Index 5/1 zugeteilt bekam.

Die gekennzeichneten Einbettmassescheiben wurden im Trokkenschrank bei ca. 90°C bis zur Gewichtskonstanz eine Stunde lang aufbewahrt, anschließend an einen dünnen Faden gebunden und gewogen.

Das Gewicht der Proben an Luft bezeichneten wir mit (G). Die gewonnenen Proben wurden in ein mit Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4) gefülltes Becherglas untergetaucht und im Exikator bei 50 Torr 10-15 Minuten lang evakuiert. Nachdem das CCl_4 wieder Raumtemperatur erreicht hatte, wurde darin das Gewicht der Probe unter Auftrieb bestimmt und mit (G_1) bezeichnet. Die Proben wurden anschließend am Faden aus dem Becherglas entnommen und solange freischwebend in der Luft gehalten, bis die Oberfläche abgetrocknet war. Anschliessend wurde die Probe in ein verschließbares Gefäß mit bekanntem Gewicht gebracht und unter Subtraktion des Taragewichtes gewogen, wodurch wir das Gewicht der mit CCl_4 gesättigten Probe (G_g) erhielten. (Alle erforderlichen qualitativen und quantitativen Untersuchungen wurden am Institut für Wasserchemie der TU München durchgeführt).

Das spezifische Gewicht von Tetrachlorkohlenstoff beträgt (bei Raumtemp. 20°C) 1,59.

Das nutzbare Porenvolumen (V_{pn}) erhalten wir aus:

$$V_{pn} = \frac{G_g - G}{CCl_4}$$

Das Feststoffvolumen mit dem nicht nutzbaren Porenvolumen (allseitig umschlossene Hohlräume) bezeichnen wir mit (V_w) Es ergibt sich aus:

$$V_w = \frac{G-G_1}{CCl_4}$$

Das Formvolumen (V_f) ergibt sich aus:

$$V_f = V_{pn} + V_w$$

Das spezifische Gewicht der porösen Proben (γ_{pp}) erhalten wir aus:

$$\gamma_{pp} = \frac{G}{V_f}$$

Das spezifische Gewicht des Feststoffes (γ_F) erhalten wir aus:

$$\gamma_F = \frac{G}{V_w}$$

Die Nutzporosität (Φ_n) ergibt sich aus:

$$\Phi_n = \frac{V_{pn}}{V_f}$$

Ergebnisse:

Tab.11

Probe	(G)	(G_l)	(G_g)
1/1	4,59	1,45	6,72
1/2	6,67	2,09	9,88
1/3	6,88	2,16	10,01
2/1	4,90	1,55	7,11
2/2	6,32	1,99	9,37
2/3	8,28	2,60	12,19
3/1	4,60	1,44	6,68
3/2	6,25	1,97	9,04
3/3	7,84	2,47	11,48
4/1	4,44	1,40	6,53
4/2	6,25	1,97	9,36
4/3	6,54	2,06	9,36
5/1	4,53	1,43	6,67
5/2	6,19	1,94	9,12
5/3	8,11	2,55	11,80

Tab.12

Probe	V_w	V_{pn}	V_f	γ_{pp}	Φ_n	γ_F
1/1	1,97	1,34	3,31	1,39	0,40	2,28
1/2	2,88	2,02	4,90	1,36	0,41	2,31
1/3	2,97	1,97	4,94	1,39	0,40	2,31
2/1	2,11	1,39	3,50	1,40	0,40	2,32
2/2	2,72	1,92	4,64	1,36	0,41	2,33
2/3	3,57	2,46	6,03	1,37	0,41	2,32
3/1	1,99	1,31	3,30	1,39	0,40	2,32
3/2	2,69	1,75	4,44	1,41	0,40	2,33
3/3	3,21	2,29	5,50	1,43	0,41	2,44
4/1	1,91	1,31	3,22	1,38	0,41	2,32
4/2	2,70	1,96	4,66	1,34	0,42	2,31
4/3	2,82	1,94	4,76	1,37	0,41	2,32
5/1	1,95	1,35	3,30	1,37	0,41	2,32
5/2	2,67	1,84	4,51	1,37	0,41	2,31
5/3	3,50	2,32	5,82	1,39	0,40	2,32

22222 Diskussion der Ergebnisse:

Die Tabelle (12) zeigt keine signifikanten Unterschiede in den 3 untersuchten Abschnitten. Weder in der Dichte der porösen Proben noch in der Dichte des Feststoffes. Die Porosität ist in den untersuchten Bereichen gleichbleibend. Damit konnte gezeigt werden, daß die beobachtete Wasserabscheidung an der Oberfläche der Massen nicht zu einer Verminderung ihrer Qualität durch unterschiedliche Porenbildung führt. Für die Porosität von Cristobalit hat sich ein Mittelwert von 40% ergeben.
Der Mittelwert für die Dichte des porösen Stoffes liegt bei $\varrho_{pp} = 1{,}38$; für die Dichte des Feststoffes erhalten wir einen Mittelwert von $\varrho_F = 2{,}32$.
Die Werte für Dihydrat und α-Cristobalit müßten demnach um diesen Wert liegen, was die folgende Tabelle weist.

α-Cristobalit	ϱ = 2,32 (tiefstabile Form) inorganic Index (119)
β-Cristobalit	ϱ = 2,16 (hochstabile Form) PHILIPSBORN (77b)
Dihydrat	ϱ = 2,32 LYON (63)
Halbhydrat	ϱ = 2,75 LYON (63)

Durch die Übereinstimmung der Feststoff-Dichte mit den Dichtewerten für α-Cristobalit und Dihydrat gilt als bewiesen, daß das gesamte Porenvolumen von Cristobalit nutzbar ist, das heißt daß die getrockneten Probekörper keine allseitig umschlossenen Hohlräume enthielten.
Die Übereinstimmung der Dichte-Werte von α-Cristobalit und Dihydrat läßt bei dieser Untersuchungsmethode keine Aussagen über Fragen der Entmischung zu. Dieses Problem soll nochmals Gegenstand einer quantitativen chemischen Analyse sein.

22223 Quantitative chemische Analyse des Gipsanteils:

Versuchsdurchführung:

Aus den Einbettmasseprobekörpern 1.-5. wurden in allen Schnitthöhen (1-3) ca. 2 Gramm schwere Proben entnommen. Um die Löslichkeit des Dihydrates zu erhöhen, wurden diese mit 50 ml konzentrierter HCl einen Tag behandelt, anschließend mit einem Liter destilliertem H_2O verdünnt und unter wiederholtem Umrühren 2 Tage stehen gelassen. Alle Proben wurden anschließend auf genau 2 Liter gebracht und 50 ml davon mit Titriplex (Fa. Merck) auf Ca^{++} titriert.
Der Probengehalt an Ca^{++} pro 1 Gramm Ausgangsstoff (P_g) ergab sich aus folgender Gleichung:

$$P_g = \frac{t \cdot f \cdot 40}{G_p} \qquad \frac{\text{mg Calzium}}{\text{1 Gramm Ausgangsstoff}}$$

t = mg Calzium/50ml Probe
f = Korrekturfaktor (0,986)
G_p = Gewicht der Probe in Gramm

Die Umrechnung in $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ erfolgte aus dem Molekulargewicht. Dabei entsprechen 40 Gramm Calzium 172 Gramm Dihydrat.

Ergebnisse:

Tab.13

Probe	mg Calzium in 1 Gramm Probe	mg Dihydrat in 1 Gramm Probe
1/1	82,8	356,04
1/2	90,8	390,44
1/3	88,9	382,27
2/1	87,2	374,96
2/2	86,9	373,67
2/3	89,2	383,56
3/1	87,8	377,54
3/2	87,2	374,96
3/3	86,6	372,38
4/1	84,3	362,49
4/2	86,9	373,67
4/3	86,3	371,09
5/1	83,4	358,62
5/2	88,8	381,84
5/3	85,7	368,51
Mittelwert		
M/1	85,1	365,93
M/2	88,1	378,83
M/3	87,3	375,39

22224 Diskussion der Ergebnisse:

- Eine Betrachtung der Mittelwerte aus Tab.13 zeigt, daß der Gehalt an Dihydrat im Bereich des Gußtrichters kleiner ist, folglich muß der Quarzanteil in diesem Bereich höher sein. Für die Bereiche 2 und 3 ergeben sich ziemlich gleichmäßige Werte.
- Als Ursache der Entmischung ist einmal die unterschiedliche Teilchengröße der Einbettmassebestandteile Gips und SiO_2 zu nennen. Zum anderen gilt es zu bedenken, daß das Anrühren des Gipses einen Lösungsvorgang darstellt; damit sinkt das schwerere SiO_2 beim Zentrifugieren ab, während das leichtere gelöste Anhydrit aufschwimmt.
- Die geringfügigen Abweichungen zwischen den einzelnen Proben sind methodisch (Analysengang, Ort der Probenentnahme) bedingt.
- Die mit zunehmendem Abstand von der Rotationsachse bereits diskutierte Verringerung der Abbindeexpansionswerte muß nach den Ergebnissen der quantitativen chemischen Analyse in einer Abnahme des Gipsanteils durch die beim Zentrifugieren auftretende Entmischung der festen Einbettmassebestandteile zu suchen sein.

2223 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Zentrifugaleinbettung

- Die Porenbildung innerhalb der Einbettmasse wird durch das Zentrifugieren nicht gestört, sondern erfolgt gleichmäßig.
- Die Zentrifugalkraft führt auch bei Einbettmassen mit feiner Körnung des Quarzanteils zu einer Entmischung der festen Komponenten Gips und Quarz.
- Der beobachtete Abbindeexpansionsgradient muß in einer Zunahme des Gipsanteils zur Rotationsachse hin begründet sein.
- Die Methode der Zentrifugaleinbettung ist für das zahnärztliche Gußverfahren nicht brauchbar, da eine Entmischung der Massen erfolgt und eine Verformung der Wachsmodelle durch zahlreiche Faktoren nie ausgeschlossen werden kann.

3 Zusammenfassung der Arbeit:

Im Anschluß an ein ausführliches Studium der Literatur, das sich vor allem auf die Problematik der Gußwachse und die Kaltexpansion von Einbettmassen erstreckte, beschäftigten wir uns experimentell mit Fragen der Abbindeexpansion. Dabei wurden mit Hilfe des Auflichtmeßverfahrens, in der Preßtechnik hergestellte Wachsmodelle und die entsprechenden Einbettmassekerne räumlich vermessen und in Relation zueinander oder zu einem entsprechenden Prüfkörper gestellt.
Durch Vergleich der Meßwerte erhielten wir Auskunft über Genauigkeit der Wachsmodelle, über ihre Verformung beim Abbinden der Einbettmassen und über die "effektive" lineare Expansion von E 316, Kerr Cristobalite sowie Aurovest. Verglichen wurden kongruente Durchmesser und Höhen des Negativs Wachsmodell und des Positivs Einbettmassemodell. Durch Verzicht auf vormarkierte Meßpunkte hat das angewandte Verfahren ermöglicht, einen rotationssymmetrischen Prüfkörper räumlich exakt zu erfassen. Der von uns verwendete Prüfkörper entspricht einem idealisierten Gußkronen-Modellstumpf.
Als Ergebnis unserer Untersuchungen fanden wir:

1) Die Aussage FALCK-WEIKARTS, daß das Wachs ein recht unbeständiges und labiles Material ist, wird auch durch unsere Untersuchungen bestätigt.
2) Der Versuch die Spannungen im Gußwachsmodell durch einen Kälteschock unwirksam zu machen, indem wir das Wachsmodell mit CO_2-Schnee schnell abkühlten, führte im Endeffekt zu keiner Verbesserung der Formkonstanz. Er bewirkte lediglich ein ungleichmäßiges Aufschrumpfen des Wachsmodelles auf den Prüfkörper und führte in manchen Fällen zu vertikaler Rißbildung im Wachsmodellman-

tel. Unter Kälteeinwirkung entspricht das Dimensionsverhalten der Wachsmodelle annähernd dem der Kunststoffgußmodelle.

3) Durch die vorausgegangene Abkühlung ist eine Formstabilisierung der Wachsmodelle bis zum Ende des Einbettvorganges nicht möglich. Das heißt, die Klärung der Frage, ob die Veränderungen der Einbettmassehohlform durch den Abbindevorgang der Einbettmasse oder das Gußwachs bewirkt wird, war mit dieser Untersuchungsmethode nicht möglich.

4) Unsere für die lineare Abbindeexpansion ermittelten Werte entsprechen unter Berücksichtigung der auftretenden Wachsexpansion den in der Literatur angegebenen Werten. Sie erlauben darüberhinaus die für die Praxis entscheidende Aussage, daß die Eigenschaften des Gußwachses und die Eigenschaften der Einbettmassen bei der Abbindung zu einer räumlichen Verzerrung der vermessenen Grundform führen.

Neben der Vakuumeinbettung benutzten wir für Kerr Cristobalite auch die Zentrifugaleinbettung. In diesem Zusammenhang wurde die Frage der für das Wachsmodell und seine Verformung kritischen Umdrehungszahl untersucht. Dichte- und Porositätsbestimmungen sowie chemische Analysen von zentrifugierten Probekörpern sollten Aufschluß über die Beschaffenheit des zentrifugierten Materials geben und die Brauchbarkeit dieser Methode für die zahnärztliche Gußtechnik klären.

Dabei konnten wir nachweisen:

1) Die Zentrifugaleinbettung ist für die Praxis ungeeignet, da sie eine Entmischung der Einbettmassenbestandteile in ihre Komponenten Bindemittel (Gips) und feuerfeste Anteile (Quarzmodifikationen) bewirkt.

2) Eine Verformung der Wachsmodelle beim Zentrifugieren ist nicht auszuschließen.

1	Asgarzadeh, K. Mahler, D.B. and Peyton, F.A.	The behavior and measurement of hygroscopic expansion of dental casting investment. J.dent.Res.4;519 (1954)
2	Beeck, K.H.	Prüfungsergebnisse zahnärztlicher Gußverfahren und ihre praktische Auswertung. Dtsch.zahnärztl.Z.8; 470 (1958)
3	Bodirsky,P.	Hydro-Kompressions-Einbettverfahren - ein neues Präzisions-Einbettsystem. dental-labor 2;43 (1972)
4	Bonsack, Ch.	Der heutige Stand des Gußproblems Dtsch.zahnärztl.Z.1;5 (1953)
5	Bonsack,Ch.	Der heutige Stand des Gußproblems Dtsch.zahnärztl.Z.2;67 (1953)
6	Buck,W.	Über die Kompensation der Kontraktion bei Metallgüssen durch verschiedene Einbettungsmethoden. Med.Diss.München 1951
7	Budzinsky,G.	Vergleichende Untersuchungen über die Einbettmassemodelle und die Paßform von ringförmigen Gußobjek-

		ten hergestellt nach der Wachsabdruck-Einbettmasse-Modellguß-Methode und der Zentrifugier-Methode Med.Diss.Marburg 1956
8	Craig,R.G. Eick, J.D. and Peyton,F.A.	Properties of Natural Waxes used in dentistry. J.dent.Res.6;1308 (1965)
9	Danz,Chr.	Einfluß der Verdichtung auf die Ausdehnung von Einbettmassen beim Vorwärmen. Med.Diss.Frankfurt 1934
10	Degussa	Ein Beitrag zur Präzisionsgußtechnik Brief Nr. 38 Dez. 1966
11	Degussa	Warum müssen Gußwachsmodelle entfettet werden. Brief Nr.39 Apr.1968
12	Dolder,E.	Nichtmetallische Werkstoffe Die Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde 5.Band; Verlag Urban und Schwarzenberg München/Berlin 1955
13	Dreyer-Jørgensen,K.	Untersuchungen über Präzisionsgußtechnik Göteborgs Tandläkare-Sällskaps Arsbok Nr.236 (1953) Ref.Quintess zahnärztl.Lit. 9; Ref. 493 (1954)

14	Dreyer-Jørgensen,K.	Prüfungsergebnisse zahnärztlicher Gußverfahren. Dtsch.zahnärztl.Z.2;461 (1958)
15	Dreyer-Jørgensen,K.	Study of the setting expansion of gypsum. Acta odont.scand.3;227 (1963)
16	Düppers,F.J.	Über die Volumenveränderungen von Gußwachsen ermittelt nach dem Ring-Stab-Test-Verfahren Med.Diss.Köln 1958
17	Earnshaw,R.	The effect of restrictiv stress on the hygroscopic setting expansion of gypsum-bonded investments Aust.dent.J. 1,22 (1969)
18	Endell,K. Hofmann,U.	Über vergleichende röntgenoptische und dilatometrische Untersuchungen an Einbettungsmassen. Zahnärztl.Rdsch.37; 1478 (1934)
19	Falck,K. Weikart,P.	Werkstoffkunde für Zahnärzte 3.Auflage; Carl Hanser Verlag München 1959
20	Feinmann,P.	Zahnärztliche Einbettungsmethoden und Gußprobleme Med.Diss.1957
21	Finkbeiner,K.	Der Einfluß unterschiedlicher Behandlung der Einbettmasse auf

das Endmaß des Gußstückes.
Med.Diss. Heidelberg 1964

22 Flaumenhaft,E. — Arbeitsmethoden zur möglichst genauen Ausnutzung der Expansion der Einbettung, Einbettungsmaßnahmen beim Gießen der Füllungen. Dtsch.zahnärztl.Wschr.13;286(1934)

23 Flaumenhaft,E. — Kritische Betrachtungen über das Gußproblem in der Zahnheilkunde. Med.Diss.Köln 1959

24 Fürer,C. — Vergleichende Untersuchungen über Porosität, Oberflächengenauigkeit und Kristallaufbau von Hartgips- und Einbettmassemodellen hergestellt nach dem Einrüttelverfahren. Med.Diss.Marburg 1966

25 Fusayama,T. — Factors and technique of precision casting. Part I and II J.prosth.dent.3;468 (1959)I Ref.Quintess zahnärztl.Lit. 12; Ref.1328 (1959)

26 Fusayama,T. Hosoda,H. and Kher,V.K. — Influence of clinical variables on a cristobalite investment. J.prosth.dent.1; 151(1961) Ref.Dtsch.Zahn-,Mund-u.Kieferheilkunde 7-8;337(1963)

27 Gehre,G. — Beitrag zum thermovolumetrischen Verhalten von Einbettmassen unter besonderer Berücksichtigung der

		Temperaturführung Med.Diss.Leipzig 1965
28	Gercken,M.	Untersuchungen über einige Mittel und Methoden zur Verbesserung der Gußtechnik in der Zahnheilkunde. Med.Diss.Bonn 1959
29	Gerlach,H.P.	Über die Kompensation von Kontraktionserscheinungen im Metallgußverfahren. Zahnärztl.Rdsch.51;2130 (1932)
30	Gerlach,H.P.	Beiträge zur Materialienkunde II Die Beeinflussung des thermischen Volumenverhaltens von Gips-Quarz-Gemischen im zahnärztlichen Gußverfahren. Dtsch.zahnärztl.Wschr.20;463(1933)
31	Gerlach,H.P.	Beiträge zur Materialienkunde III Wieweit können die Kaltexpansion der Einbettmasse und die Wachsexpansion das Gußresultat beeinflussen. Dtsch.zahnärztl.Wschr.31;746(1933)
32	Gerlach,H.P.	Neue Forschungsergebnisse über die Kompensation von Kontraktionserscheinungen in Metallgußverfahren durch hochexpandierende Einbettungsmassen. Z.Stomat.7;427 (1933)

33	Gerlach,H.P.	Die Höhe der Restkontraktion und ihr Ausgleich im Gußverfahren. Zahnärztl.Rdsch.7;262 (1934)
34	Grassl.J.F.	Verbesserung der Oberfläche von Güssen durch Netzmittel und Vakuumeinbettung. Dtsch.zahnärztl.Z.18;1057 (1954)
35	Haag, R.	Experimentelle Untersuchungen über die Erstarrungszeit, Kugeldruckhärte und Druckfestigkeit der gipsfreien Einbettmassen AurovestW, DeguvestHFG, Ceramigold Investment. Med.Diss.Mainz 1970
36	Han,D.S.	Experimentelle Untersuchungen zur weiteren Klärung des Gußproblems. Dtsch.Mschr.Zahnheilk.6;530(1930)
37	Hansohm,P.	Vergleichende Bestimmung der Restkontraktionswerte gebräuchlicher Gußmetalle beim zahnärztlichen Gußverfahren Med.Diss.Frankfurt 1937
38	Harndt,E.	Der Goldguß in der zahnärztlichen Praxis. Dtsch.zahnärztl.Wschr.30;710 (1933)

39	Hehring,H.	Die prozentualen linearen Veränderungen eines Palliaggusses in Abhängigkeit von verschiedenen Einbettungsmethoden. Med.Diss.Berlin 1955
40	Hehring,H.	Einbettmassen: in Eichner,K. Leitfaden zahnärztlicher Werkstoffe und ihrer Verarbeitung. Berlinische Verlagsanstalt Berlin 1960
41	Henning,G.	Der Einfluß von Netzmitteln auf die Oberflächenqualität von Güssen. dental-labor 10;17 (1970)
42	Höfer,G.	Über das Volumenverhalten einiger zahnärztlicher Einbettungsmassen unter Berücksichtigung der hygroskopischen Expansion nach Scheu Med.Diss.Leipzig 1957
43	Hönig,P.	Vergleichende Untersuchungen über das Volumenverhalten von Einbettmassen unter besonderer Berücksichtigung der hygroskopischen Einbettmethode. Med.Diss.Berlin 1968
44	Ilg,V.K.	Über Expansions- und Kontraktionserscheinungen in der indirekten Technik,Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 58,95 (1948)

45	Ilg,V.K.	Untersuchungen zur indirekten Technik, im besonderen zur Abdruckgenauigkeit in der indirekten Technik. Dtsch.zahnärztl.Z.21;1226 (1954)
46	Ilg,V.K.	Untersuchungen zur "indirekten Technik" Teil I Dtsch.zahnärztl.Z.17;1305 (1959)
47	Ilg,V.K.	Untersuchungen zum Dimensionsverhalten der Silikone-Abdruckmassen Dtsch.zahnärztl.Z.5;405 (1959)
48	Kowkowicz,A.A.	Experimentelle Untersuchungen über die Wirksamkeit der Vakuum-Druckeinbettung beim zahnärztlichen Gußverfahren Med.Diss.Tübingen 1949
49	Klumpp,D.	Einfluß des Muffelwerkstoffes auf die Paßgenauigkeit zahnärztlicher Güsse Med.Diss.Mainz 1959
50	Knischewski,F.	Die theoretischen Grundlagen der Zahnprothetik. Teil II Die nichtmetallischen Werk- und Hilfsstoffe der Zahntechnik. Neunte Auflage Verlag Neuer Merkur München 1965
51	Könsgen,W.	Die Maßgenauigkeit von Gußringen bei der Vakuumeinbettmethode Med.Diss.Marburg 1956

52	Körber,E.	Gips: in Eichner,K. Leitfaden zahnärztlicher Werkstoffe und ihrer Verarbeitung Berlinische Verlagsanstalt Berlin 1960
53	Kräutle,L.	Die Auswirkungen der Abbindeexpansion von Einbettungsmassen auf die Wachsmodelle Med.Diss.Berlin 1961
54	Krosta	Arbeitsgemeinschaft für Prothetik und Werkstoffkunde. Einbettmassen Dtsch.zahnärztl.Wschr.32 ;733 (1936)
55	Kubasch,W.	Über die Technik des Präzisionsgusses Degussa Pforzheim 1961
56	Kusner,W.	Final expansion of plaster J.dent.Res.5;694 (1968)
57	Landgren,N. Peyton,F.A.	Hygroscopic expansion of some casting investments. J.dent.Res.4;469(1950)
58	Langer,A.	Problem der einwandfreien Herstellung der MOD-Gußfüllung. Med.Diss.München 1948
59	Lautenschlager,E.P. Corbinian,F.	Investigation on the expansion of dental Stone. J.dent.Res.2;206 (1969) Ref.Dtsch.Zahn-Mund-u.Kieferheilk.1-4; 151(1970)

60	Lasater,R.L.	Control of Wax distortion by manipulation J.Amer,dent.Ass.4;518 (1940)
61	Lindermann,R.	Untersuchungen über Wege zur Erzielung größter Genauigkeit in der Inlaytechnik - Med.Diss. Köln 1957
62	Lyon,H.W. Dickson,G. Schoonover,I.C.	Effectiveness of vacuum investing in the elimination of surface defects in gold castings J.Amer.dent.Ass.2;198 (1953)
63	Lyon,H.W. Dickson,G. Schoonover,I.C.	The mechanism of hygroscopic expansion in dental casting investments J.Amer.dent.Ass.1;44 (1955)
64	Maves,W.	Recent experiments demonstrating wax distortion on all wax patterns when heat is applied. J.Amer.dent.Ass.19;606)1932)
65	Mahler,D.B. Moffitt,R.E.	Further evidence on the hygroscopic expansion of dental gypsum materials. J.dent.Res.37;95 (1958)
66	Mahler,D.B. Ady,A.B.	An explanation for the hygroscopic setting expansion of dental gypsum Products. J.dent.Res.3;578 (1960) Ref.Dtsch.Zahn-Mund u.Kieferheilk.7-8; 578 (1963)

67	Mahler,D.B. Bruce,A.	The effect of the water bath in hygroscopic Casting techniques J.prosth.Dent.6;1115 (1965)
68	Mumford,G. Phillips,R.W.	Dimensional change in wax patterns during setting of gypsum investments. J.dent.Res. 2;351 (1958)
69	Nelke,J.	Untersuchungen über die physikalischen Eigenschaften von Gußwachsen und ihre Nutzanwendung für die zahnärztliche Gußtechnik. Med.Diss.Freiburg 1938
70	Oehrlein,A.	Cristobalit eine neue Einbettmasse Zahnärztl.Rdsch.27;1228 (1933)
71	Oeschger, H.X.	Vergleichende Untersuchungen über das Einbetten mit im Vakuum von Luftblasen befreiter Einbettmasse. Dtsch.Zahn-Mund-u.Kieferheilk. 5-6;208 (1955)
72	Oettinger,R.	Expansionstechnik zum Ausgleich der Restkontraktion der Goldlegierungen beim Guß. Zahnärztl.Rdsch.3;99 (1934)
73	Ohasi,M. Pfaffenberger,G.C.	Melting,flow,and thermal expansion characteristics of some dental and commercial waxes. J.Amer. dent.Ass.5; 1141(1966)

74	Ohasi,M. Stanford,W. Pfaffenberger,G.C.	Pertinent data on some physical properties of different investments used in the casting of gold alloys. Journal of Nihon University School of Dentistry.3; 121(1967)
75	Orban,B.	Die Expansionsgußtechnik Z.Stomat. 1; 9 (1930)
76	Overdiek,H.F.	Die Anwendung des Vakuums in der Zahnheilkunde. Carl Hanser Verlag München 1962
77a	Phillips,R.W.	Distortions of wax patterns as influenced by storage time, storage temperature and temperature of wax manipulation. J.Amer.dent.Ass.41;28 (1950)
77b	Philipsborn von H.	Tafeln zum Bestimmen der Minerale nach äußeren Kennzeichen. 2.Auflage E.Schweizerbarthsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1962
78	Prenz,D.	Der Einfluß des Vakuums auf die zahnärztlichen Einbettmassen Med.Diss.Jena 1961
79	Preissecker,O.	Die Gußmethoden mit Wachsexpansion Z.Stomat. 2;111(1930)
80	Price,W.A.	The laws determining the behavior of gold in fusing and casting. Dent.Cosmos 53;265 (1911)

81	Rehberg,H.J.	Beitrag zur Frage der Prüfmethodik zahnärztlicher Wachse. Dtsch.zahnärztl.Z.21;1428(1955)
82	Rehberg,H.J.	Hohlraummessungen in Einbettmassen Dtsch.zahnärztl.Z.11;1340 (1967)
83	Reither,W.	Neue Versuche zur Gußtechnik und ihre Auswertung. Dtsch.zahnärztl.Z.11; 1252(1965)
84	Reither,W.	Vergleichende Untersuchungen über das Dimensionsverhalten von Wachs- und Kunststoff-Gußmodellen Schweiz.Mschr.Zahnheilk.76;40 (1966)
85	Reither,W. Steck,W.	Neue Untersuchungen über die Abbinde, expansion verschiedener Einbettmassen. Dtsch.zahnärztl.Z.10;1236 (1967)
86	Rigbers,W.	Über Vorbedingungen des Präzisionsgusses Med.Diss.Frankfurt 1938
87	Rohrbach,H.	Über den Einfluß von Gußspannungen auf die Formabweichungen zahnärztlicher Gußstücke Med.Diss.Tübingen 1961
88	Rosenzweig,M.	Der heutige Stand der Expansionstechnik Zahnärztl.Rsch.52;2181 (1932)

89	Roßmann,Chr.	Vergleichende Oberflächenuntersuchungen zahnärztlicher Gußobjekte nach Vakuum und Überdruckeinbettung. Med.Diss.Halle 1959
90	Ryge,G. Fairhurst,C.W.	Hygroscopic expansion J.dent.Res.34;745 (1955)
91	Schacke,W.	Chemisch-physikalisch-technologische Untersuchung und Prüfung von Gips und seine Verwendung in der Zahnheilkunde Schweiz.Mschr.Zahnheilk.5;253 (1927)
92	Scheu,C.H.	Controlled hygroscopic expansion of investment to compensate for shrinkage in inlay casting. J.Amer.dent.Ass.3;452 (1935)
93	Schnell,R.J. Mumford,G. Phillips,R.W.	An evaluation of phosphate bonded investments used with a high fusing gold alloy. J.prosth.Dent. 2;324 (1964) Ref.dtsch.Zahn-Mund-u.Kieferheilk.1-2;77 (1964)
94	Schubert,L.	Über Fragen des Goldgußverfahrens. Zahnärztl.Rdsch.11;445 (1930)
95	Schubert,L.	Über Volumenveränderungen von Einbettungsmassen. Dtsch.zahnärztl.Wschr.22;1194 (1932)

96	Schubert,L.	Expansionsgußverfahren und Untersuchungen über ihren praktischen Wert. Dtsch.zahnärztl.Wschr.2;69 (1932)
97	Schwindling,R.	Untersuchungen der Oberflächenfeinstruktur von Metallgüssen bei verschiedener Einbettungsart unter Vakuum. Zahnärztl.Rdsch.18;477 (1955)
98	Shell,J.S.	The effect of longitudinal restrictive force on hygroscopic expansion J.dent.Res.2;287 (1961)
99	Shell,J.S.	Setting and thermal expansion of investments, Part I: Effects of short vs. full length asbestos liners. J.Alabama Dent.Assn. 4;17 (1968) Ref.Dent.Abstracts 7; 415(1969)
100	Shell,J.S.	Setting and thermal expansion of Investments. Part II: Effects of changes in water/powder ratio dry vs. wet liners and liner short on one end of ring only. J. Alabama Dent.Assn. 4;22 (1968) Ref.Dent.Abstracts 6;289 (1969)
101	Singer,F. Peukert,P.	Der heutige Stand der Gußtechnik. Zahnärztl.Reform 17-18,323 (1954)
102	Smreker,E.	Das Gußverfahren für Goldeinlagefüllung unter besonderer Berücksichtigung des Kerr'schen Verfah-

		rens. Zahnärztl.Rdsch.1;18 (1932)
103	Smyd,E.S.	Factors which influence casting accuracy. J.Amer.dent.Ass. 2;160 (1948)
104	Solbrig,O.	Welche Faktoren bedingen die Formveränderungen im zahnärztlichen Gußverfahren Vjschr.Zahnheilk. 1;81 (1922)
105	Spanner,J.	Grundlagen der Gußtechnik. Schweiz.Mschr.Zahnheilk.1;1(1933)
106	Suffert,L.W. Mahler,D.B.	Reproducibility of gold castings made by present day dental casting technics. J.Amer.dent.Ass. 1; 1 (1955)
107	Sweeney,W.T.	Cristobalite for dental investment J.Amer.dent.Ass.1;108 (1933)
108	Taege,F.	Untersuchungen über die hygroskopische Expansion von Einbettmassen Dtsch.zahnärztl.Z.3;116 (1958)
109	Titkemeyer,W.	Einbettung für den Edelmetallguß unter Vakuum Zahnärztl.Welt 13;345 (1956)
110	Türkheim,H. Schröder,J.	Über die räumliche Ausdehnung des Gipses Dtsch.zahnärztl.Wschr.11;249(1933)

111	Vergé,J.	Contribution á l'étude de la coulé de précision. Schweiz.Maschr.Zahnheilk.3;171 (1967)
112	Vogel,W.	Untersuchungen über die Möglichkeit der Verwendung schnellhärtender Kunststoffe als Modellmaterial in der zahnärztlichen Gußtechnik Med.Diss.Greifswald 1957
113	Wagner,E.	Beitrag zum Präzisionsgußverfahren Dtsch.zahnärztl.Z.10; 1215 (1967)
114	Weikart,P.	Zum Thema Präzisionsguß Zahnärztl.Welt 4; 90 (1955)
115	Weiß,J.	Über das Gießen von Goldeinlagen Z.Stomat. 7;787 (1932)
116	Windish,B. Wetterström,E.	Wie man Inlay-Wachs behandelt Thermotrol technician 4; Ref.Quintess.zahnärztl.Lit. Ref.2292;59 (1964)
117	Winther,Chr. Madsen,E.A.	Zur Messung der Abbindung des Gipses Dtsch.zahnärztl.Wschr.38;885 (1935)
118	Zähringer,W.	Guß und Angußkronen.Untersuchungen über die Paßgenauigkeit in Abhängigkeit vom Präparationswinkel. Med.Diss. München 1963

119 Hamenlos Inorganic Index to the Powder Diffraction File (1970) Compiled and Published by the Joint Committee on Powder Diffraction standards 1845, Walnut Street Philadelphia, P.A.19103

Für die Überlassung des Themas und seiner Versuchsvorrichtungen sowie für wertvolle Ratschläge möchte ich Herrn Prof.Dr.Dr.W.Reither meinen aufrichtigen Dank aussprechen.
Besonderen Dank schulde ich auch Herrn Prof.Dr.E.Kraft für das Verständnis, das er meiner Arbeit entgegenbrachte.

Lebenslauf:

Am 4.8.1942 wurde ich als zweiter Sohn des Elektroingenieurs Alois Steck und seiner Frau Ida Steck geb. Rampp in Berlin-Siemensstadt geboren.
Von 1948-1952 besuchte ich die Volksschule in München. Anschließend trat ich in die Klenze-Oberrealschule ein, wo ich im Juli 1962 die Reifeprüfung ablegte.
Mit dem Wintersemester 1962 begann ich das Studium der Zahnheilkunde an der Universität in München. Am 7.7.1965 heiratete ich Fräulein Bärbel Jungesblut, am 25.7.1966 bestand ich die zahnärztliche Vorprüfung und am 3.7.1969 das zahnärztliche Staatsexamen in München.
Seit dem 16.7.1969 bin ich als Assistent in der Prothetischen Abteilung der Universitätszahnklinik München tätig und habe vom 6.4.1970 bis zum 5.7.1970 als Stabsarzt der Reserve an einer Wehrübung teilgenommen.